



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**

## **Reutilização de Catalisador exausto da Indústria Petroquímica em materiais à base de Cimento**

**MARIA INÊS DE ALMEIDA LAGINHA DA CONCEIÇÃO**  
Licenciada em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização  
de Edificações

**Orientadora:**

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa, Prof. Coordenadora (ISEL)

**Júri:**

Presidente: Doutora, Maria Ana Viana Baptista, Prof. Coordenadora com Agregação (ISEL)

Vogais:

Doutor, Paulo Alexandre Carapinha Marques, Prof. Coordenador (ISEL)

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa, Prof. Coordenadora (ISEL)

**Novembro de 2011**





**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**

## **Reutilização de Catalisador exausto da Indústria Petroquímica em materiais à base de Cimento**

**MARIA INÊS DE ALMEIDA LAGINHA DA CONCEIÇÃO**  
Licenciada em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização  
de Edificações

**Orientadora:**

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa, Prof. Coordenadora (ISEL)

**Júri:**

Presidente: Doutora, Maria Ana Viana Baptista, Prof. Coordenadora com Agregação (ISEL)

Vogais:

Doutor, Paulo Alexandre Carapinha Marques, Prof. Coordenador (ISEL)

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa, Prof. Coordenadora (ISEL)

**Novembro de 2011**



## RESUMO

A produção de cimento é um processo que envolve um impacto ambiental significativo, uma vez que necessita de apreciáveis quantidades de recursos naturais não-renováveis e energia, além de contribuir para a emissão de poluentes, particularmente CO<sub>2</sub>, para a atmosfera.

A presente dissertação pretende contribuir para o desenvolvimento de novos materiais à base de cimento, com menor impacto ambiental, substituindo parcialmente o cimento corrente por dois resíduos industriais diferentes: um oriundo da indústria petrolífera, concretamente um catalisador exausto da unidade de “*cracking*” catalítico (FCC) e o outro da indústria da transformação de pedra natural. Neste sentido, estudaram-se diferentes misturas de cimento com incorporação de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural calcária, bem como, com a incorporação simultânea de ambos os resíduos, para avaliar se os cimentos compostos, a que dão origem, correspondem aos requisitos mecânicos e físicos, aos quais os cimentos e seus constituintes devem respeitar, para serem certificados pela norma NP EN 197-1 [1]. A campanha experimental teve como objecto de estudo 21 formulações de cimentos sem e com incorporação de resíduo(s) com as quais se estudou: no estado fresco – os tempos presa, a trabalhabilidade, a massa volúmica e o teor em ar; no estado endurecido – a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, a resistência mecânica e a absorção de água por capilaridade.

Apesar de ambos os resíduos acelerarem o início de presa, todas as pastas formuladas satisfazem o requisito físico preconizado pela norma NP EN 197-1 [1].

A utilização de catalisador do “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (FCC) conduz à diminuição da fluidez da argamassa e proporciona o incremento da resistência mecânica. As misturas com incorporação de 15% de resíduo – tanto de FCC como de pedra natural – cumprem os requisitos mecânicos, conforme o requerido pela norma NP EN 197-1 [1]. Também as misturas com incorporação de ambos os resíduos satisfazem este requisito, para teores de substituição de cimento de 20%. A velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas é correlacionável com a resistência mecânica das argamassas produzidas.

A utilização destes resíduos na qualidade de substitutos parciais do cimento demonstrou-se viável podendo traduzir-se na produção de cimentos com propriedades melhoradas.

### Palavras-chave:

Materiais à base de cimento; Cimento corrente; Reutilização de resíduos industriais; Catalisador exausto da unidade de “*cracking*” catalítico (FCC); Resíduo de pedra natural.



## ABSTRACT

Cement production is a process that involves a significant environmental impact, since it requires considerable amounts of non-renewable natural resources and energy as well as contributes to an increase of pollutants emission, especially CO<sub>2</sub>, into the atmosphere.

This thesis aims to contribute to the development of new cement-based materials with lower environmental impact. Within this scope partial replacement of cement by two different industrial wastes was investigated. (i) a waste produced by the oil industry, namely a waste catalyst from Fluidized Catalytic Cracking (FCC) unit; and (ii) a waste generated during natural stone processing. For this purpose, several blended cements incorporating waste FCC catalyst and waste natural stone as well as blended cements simultaneously incorporating both wastes, were prepared to assess their correspondence to the physical and mechanical requirements of the European Standard NP EN 197-1 [1]. Tests were conducted on 21 cement formulations, with and without incorporation of wastes, to evaluate: in fresh state – time setting, workability, bulk density and air content; and, in the hardened state - the propagation velocity of ultrasonic waves, mechanical strength and water absorption by capillarity.

Although, both wastes accelerate the setting time, all mortars prepared using the blended cements met the physical requirements recommended by the standard NP EN 197-1 [1].

The use of a catalyst for cracking fluidized catalytic (FCC) leads to a reduction in mortars workability, but increases their mechanical strength. Mechanical requirements, specified by the standard NP EN 197-1 [1] are met by: (i) blended cements with 15% of waste incorporation, either FCC or natural stone and (ii) blended cements with 20% of both wastes incorporation. The velocity of propagation of ultrasonic waves is correlated with the mechanical strength of tested mortars.

The use of these wastes as a partial substitute of cement proved to be feasible leading, under certain conditions, to blended cements with improved properties.

**Keywords:**

Cement-based materials; Cement; Reuse of industrial waste; Catalyst exhausted from the petrochemical industry; Waste of natural stone.



## AGRADECIMENTOS

Concluo com este trabalho mais uma importante fase da minha vida que não teria tido o sucesso que teve sem a ajuda de algumas pessoas a quem desejo deixar o meu agradecimento.

À Doutora Carla Maria Costa, orientadora desta dissertação, agradeço a oportunidade e confiança concedida para a realização da mesma. Expresso o meu agradecimento pela orientação séria e exigente, mas também pela motivação, incentivo, entusiasmo e disponibilidade sempre revelados. Agradeço os conhecimentos transmitidos, precisão, rigor científico e espírito crítico, evidenciado na correcção desta dissertação, que contribuíram para o enriquecimento literário da mesma.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção do ISEL, por terem permitido o meu livre acesso a todos os equipamentos, pelo acolhimento afável no seu ambiente de trabalho e pela ajuda prestada no esclarecimento de dúvidas decorrentes do trabalho experimental, em particular, à Técnica Superior Raquel Milho e ao Técnico Experimentador António Fernandes.

Agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), os recursos disponibilizados que permitiram a concretização desta dissertação, através do Projecto de Investigação (Ref.<sup>ª</sup> PTDC/ECM/113115 /2009) “ECO-Zement: Reutilização do resíduo de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado da refinação de petróleo em materiais de base cimentícia”.

Pela cedência e disponibilização de materiais, expresso o meu agradecimento às seguintes entidades: CIMPOR – Cimentos de Portugal, SGPS, S.A.; GESTIN – Associação Gestora de Inertes; PARAPEDRA (Sifucel); Petrogal; e SIKA.

Agradeço aos meus pais e a toda a família por estarem sempre presentes e serem cuidadosos na forma como, desde sempre, me incentivam e encaminham para que seja sempre bem-sucedida, revelando-se incessantemente os meus melhores amigos. Agradeço o facto de se interessarem e quererem participar na minha vida de estudante. Reconheço, especialmente, à minha irmã, Rita, o companheirismo e, sempre que possível, a cooperação ao longo da realização da campanha experimental.

O meu último agradecimento é para este Instituto, gratulo o rigor empregue no ensino, a postura e profissionalismo dos professores com quem tive o prazer de me cruzar durante estes cinco anos de curso que indiscutivelmente me tornaram mais persistente e que contribuíram para a minha formação na área de Engenharia Civil.



# ÍNDICE DO TEXTO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA .....	1
1.3. OBJECTIVO DO TRABALHO .....	2
1.4. ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	2
1.5. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	5
2.2. IMPACTOS AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO.....	6
2.2.1. A INDÚSTRIA DO CIMENTO NO CENÁRIO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	6
2.2.2. PRODUÇÃO DE CIMENTO E POSSÍVEIS MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO SEU IMPACTO AMBIENTAL.....	7
2.3. CIMENTOS CORRENTES.....	10
2.3.1. DEFINIÇÃO, COMPOSIÇÃO E REQUISITOS.....	11
2.3.2. HIDRATAÇÃO.....	13
2.4. SUBSTITUTOS PARCIAIS DO CIMENTO.....	14
2.4.1. RESÍDUO DE CATALISADOR EXAUSTO PETROQUÍMICO .....	15
2.4.2. RESÍDUO DE PEDRA NATURAL CALCÁRIA.....	18
2.4.3. SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR DOIS MATERIAIS: RESÍDUOS DE CATALISADOR EXAUSTO PETROQUÍMICO E PEDRA NATURAL CALCÁRIA.....	19
<b>3. CAMPANHA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>21</b>
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	21
3.2. DESCRIÇÃO DO PLANO DE ENSAIOS .....	24
3.3. MATERIAIS .....	26
3.3.1. LIGANTE .....	27
3.3.2. AGREGADO.....	27
3.3.3. ÁGUA .....	29
3.3.4. SUPERPLASTIFICANTE .....	29

3.4. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	29
3.4.1. PRODUÇÃO DA PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL.....	29
3.4.1.1. TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PRESA .....	31
3.4.2. PRODUÇÃO DE ARGAMASSA .....	33
3.4.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO .....	35
3.4.2.2. MASSA VOLÚMICA.....	37
3.4.2.3. TEOR DE AR.....	39
3.5. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	40
3.5.1. MOLDAGEM, CONDICIONAMENTO E DESMOLDAGEM DE PROVETES .....	40
3.5.1.1. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS .....	43
3.5.1.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO E À COMPRESSÃO .....	46
3.5.1.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	49
<b>4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL ....</b>	<b>53</b>
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	53
4.2. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO .....	54
4.2.1. TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PRESA .....	54
4.2.2. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO.....	58
4.2.3. MASSA VOLÚMICA .....	64
4.2.4. TEOR DE AR.....	67
4.3. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO .....	72
4.3.1. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS.....	73
4.3.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO E À COMPRESSÃO .....	81
4.3.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	104
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>117</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	117
5.1.1. CONCLUSÕES .....	118
5.1.2. CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO APRESENTADO FACE AOS OBJECTIVOS INICIALMENTE PROPOSTOS .....	121
5.2. PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO .....	122
<b>ANEXOS.....</b>	<b>131</b>
ANEXO A – PLANEAMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	A.i

ANEXO B – FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS.....	B.i
ANEXO C – FICHAS DE REGISTO .....	C.i
ANEXO D – TRATAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS .....	D.i



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Os 27 produtos da família de cimentos correntes, extraído de [1].	12
Quadro 2.2 - Compostos principais do cimento Portland, adaptado de [29].	13
Quadro 3.1 - Designação e composição das misturas estudadas.	22
Quadro 3.2 - Campanha de ensaios desenvolvida para todas as misturas estudadas.	23
Quadro 3.3 - Composição granulométrica da areia normalizada/comercial CEN, preconizada pela norma NP EN 196-1 [69].	28
Quadro 3.4 - Composição granulométrica da areia normalizada misturada em laboratório.	28
Quadro 3.5 - Materiais utilizados na obtenção da pasta de consistência normal.	30
Quadro 3.6 - Materiais utilizados na determinação dos tempos - início e fim - de presa da pasta de consistência normal – estado fresco.	31
Quadro 3.7 - Materiais utilizados na produção de argamassas.	33
Quadro 3.8 - Materiais utilizados na determinação da consistência por espalhamento - ensaio estado fresco.	35
Quadro 3.9 - Materiais utilizados na determinação da massa volúmica - estado fresco.	38
Quadro 3.10 - Materiais utilizados na determinação do teor de ar - estado fresco.	39
Quadro 3.11 - Materiais utilizados na moldagem, condicionamento e desmoldagem de provetes prismáticos.	41
Quadro 3.12 - Materiais utilizados na determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em provetes prismáticos - estado endurecido.	44
Quadro 3.13 - Materiais utilizados na determinação da resistência mecânica - estado endurecido.	47
Quadro 3.14 - Materiais utilizados na determinação da absorção de água por capilaridade – estado endurecido.	50
Quadro 4.1 - Tempos – início e fim – de presa (min) das pastas de consistência normal das misturas estudadas de acordo com a respectiva família – estado fresco.	54
Quadro 4.2 - Consistência obtida por espalhamento (mm) das argamassas das misturas estudadas, de acordo com a respectiva família – estado fresco.	60
Quadro 4.3 - Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) das argamassas das misturas estudadas de acordo com a respectiva família – estado fresco.	64
Quadro 4.4 - Teor de ar (%) das argamassas das misturas estudadas de acordo com a respectiva família – estado fresco.	68
Quadro 4.5 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas (média $\pm$ desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas da família de referência – estado endurecido.	75

Quadro 4.6 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sônicas (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. .77	77
Quadro 4.7 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sônicas (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por pedra natural calcária (família de misturas binárias) – estado endurecido.....79	79
Quadro 4.8 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sônicas (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, da família das misturas ternárias – estado endurecido. ....81	81
Quadro 4.9 - Relação entre as resistências mecânicas (MPa) – flexão e compressão – avaliadas ao longo do tempo de hidratação. ....81	81
Quadro 4.10 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas da família de referência – estado endurecido. ....84	84
Quadro 4.11 - Índice de actividade (IA), da família de referência, com base na resistência à flexão. ..84	84
Quadro 4.12 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. ....85	85
Quadro 4.13 - Índice de actividade (IA), das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias), com base na resistência à flexão.....86	86
Quadro 4.14 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média±desvio padrão) avaliada em provetes prismáticos com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. ....88	88
Quadro 4.15 - Índice de actividade (IA), das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias), com base na resistência à flexão.....89	89
Quadro 4.16 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, da família das misturas ternárias.....90	90
Quadro 4.17 - Índice de actividade (IA), da família das misturas ternárias, com base na resistência à flexão. ....91	91
Quadro 4.18 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas da família de referência – estado endurecido. ....93	93
Quadro 4.19– Índice de actividade (IA), da família de referência, com base na resistência à compressão. ....93	93
Quadro 4.20 - Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ ), para os diferentes tempos de hidratação, da família de referência. ....94	94

Quadro 4.21 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. ....	95
Quadro 4.22 - Índice de actividade (IA), das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias), com base na resistência à compressão. ....	95
Quadro 4.23 - Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ ), para os diferentes tempos de hidratação, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias). ....	98
Quadro 4.24 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família de misturas binárias) – estado endurecido. ....	99
Quadro 4.25 - Índice de actividade (IA), das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias), com base na resistência à compressão. ....	100
Quadro 4.26 - Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ ), para os diferentes tempos de hidratação, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias). ....	101
Quadro 4.27 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, da família das misturas ternárias – estado endurecido. ....	102
Quadro 4.28 - Índice de actividade (IA), da família das misturas ternárias, com base na resistência à compressão. ....	103
Quadro 4.29 - Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ ), para os diferentes tempos de hidratação, da família das misturas ternárias). ....	104
Quadro 4.30 - Coeficiente de capilaridade, $c$ ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{min}^{1/2}$ ), das argamassas das misturas estudadas de acordo com a respectiva família – estado endurecido. ....	105
Quadro 5.1 - Quadro-síntese com os valores das propriedades avaliadas no estado fresco, em relação às misturas com incorporação de resíduo(s) que correspondem aos requisitos mecânicos e físicos, impostos pela norma NP EN 197-1 [1], avaliados neste trabalho. ....	120
Quadro 5.2 - Quadro-síntese com os valores das propriedades avaliadas no estado endurecido, em relação às misturas com incorporação de resíduo(s) que correspondem aos requisitos mecânicos e físicos, impostos pela norma NP EN 197-1 [1], avaliados neste trabalho. ....	121



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perspectiva cronológica da concentração de dióxido de carbono e da variação da temperatura na atmosfera, extraído de [16]. .....	6
Figura 2.2 - Consumo global de cimento, extraído de [20]. .....	7
Figura 2.3 - Esquema geral do processo de produção de cimento, extraído de [22]. .....	8
Figura 3.1 - Resíduos sólidos industriais. a) Catalisador exausto oriundo da indústria petrolífera; b) Imagem de microscopia electrónica de varrimento, obtida em modo de electrões secundário (JEOL JSM 7001F), das partículas dos catalisadores exaustos da unidade de FCC da refinaria da Petrogal em Sines [70]; c) Resíduo de pedra natural proveniente da transformação de pedra natural. ....	27
Figura 3.2 - Separação granulométrica (peneiração mecânica). a) Série de peneiros de malha quadrada; b) Resíduo de areia (AS 30/40) acumulado (na malha 0,5 mm). ....	28
Figura 3.3 - Fases de preparação da pasta de consistência normal. a) Calçamento da pasta no molde; b) Regularização da superfície da pasta; c) Aparelho de Vicat (sonda $\varnothing 10\text{mm}$ ). ....	30
Figura 3.4 - Fases de determinação dos tempos – início e fim – de presa (estado fresco). a) Molde e placa imersos no recipiente; b) Ajuste da agulha de determinação do início de presa no aparelho de Vicat; c) Determinação do tempo de fim de presa; d) Detecção visual do fim de presa. ....	32
Figura 3.5 - Fases de preparação de argamassa. a) Misturadora mecânica; b) Misturadora em funcionamento ( $v_1$ ); c) Recolha da argamassa aderente às paredes e fundo da cuba. ....	34
Figura 3.6 - Fases do ensaio de consistência por espalhamento (estado fresco). a) Compactação com pilão de madeira da 1ª camada; b) Emprego da 2ª camada de argamassa; c) Compactação com pilão de madeira da 2ª camada; d) Regularização da superfície; e) Levantamento do molde tronco-cónico; f) Espalhamento da argamassa na mesa de espalhamento, após 15 pancadas; g) Medição do espalhamento da argamassa (direcção 1); h) Medição do espalhamento da argamassa (direcção 2). ....	36
Figura 3.7 - Fases do ensaio de determinação do teor de ar (estado fresco). a) Colocação da 1ª camada de argamassa no recipiente; b) Compactação da 1ª camada de argamassa; c) Limpeza do exterior e bordos do recipiente; d) Injecção de água no aerómetro; e) Bombeamento; f) Leitura do teor de ar. ....	40
Figura 3.8 - Moldagem e condicionamento de provetes prismáticos ( $40 \times 40 \times 160\text{mm}^3$ ). a) Posicionamento do molde na mesa de compactação; b) Introdução da 1ª camada de argamassa no molde; c) Distribuição uniforme da 1ª camada de argamassa; d) Mesa de compactação mecânica; e) Regularização da superfície; f) Moldes na câmara de cura. ....	41
Figura 3.9 - Desmoldagem de provetes prismáticos ( $40 \times 40 \times 160\text{mm}^3$ ). a) Identificação dos provetes de ensaio; b) Pesagem dos provetes de ensaio; c) Imersão dos provetes em água (câmara de cura). ....	42

Figura 3.11 - Fases do ensaio determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (estado endurecido). a) Montagem e ligação do sistema; b) Aplicação de camada de vaselina no cilindro de referência; c) Calibração do aparelho (cilindro de referência); d) Aplicação de camada de vaselina no provete ensaiado; e) Determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas. ....	45
Figura 3.12 - Fases do ensaio determinação da resistência mecânica (estado endurecido). a) Máquina de ensaios de resistência mecânica; b) Posicionamento do prisma na máquina de resistência à flexão; c) Accionamento do dispositivo de carga para determinação da resistência à flexão; d) Posicionamento do prisma na máquina de resistência à compressão; e) Accionamento do dispositivo de carga para determinação da resistência à compressão; f) Provetes após ensaio. ....	47
Figura 3.13 - Fases do ensaio determinação da absorção de água por capilaridade (estado endurecido). a) Estufa a $40 \pm 5^\circ\text{C}$ ; b) Acondicionamento dos provetes a estufa; c) Provetes ensaiados à temperatura ambiente; d) Aquário – sistema utilizado no ensaio; e) Retirar o provete do aquário, para efeito de determinação da massa e altura de ascensão capilar; f) Determinação da altura de ascensão capilar na face (face 1) do prisma. ....	50
Figura 4.1 - Tempos – início e fim – de presa (min) das pastas de consistência normal com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre os tempos de presa e a quantidade de água, em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC). ....	56
Figura 4.2 - Tempos – início e fim - de presa (min) das pastas de consistência normal com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre os tempos de presa, e a quantidade de água, em função da percentagem incorporação de resíduo de pedra natural. ....	57
Figura 4.3 - Tempos – início e fim – de presa (min) das pastas de consistência normal da família das misturas ternárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre os tempos de presa, e a quantidade de água, em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC. A tracejado está representada a linha de tendência entre os tempos de presa, em função da percentagem de incorporação de 20% de resíduos, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )). ....	58
Figura 4.4 - Consistência obtida por espalhamento (mm) da mistura de referência, 100C, e das misturas 85C+15FCC, testadas, para diferentes incorporações de superplastificante (SikaPlast 898) – estado fresco. ....	59

Figura 4.5 - Consistência obtida por mesa de espalhamento (mm) das argamassas das misturas estudadas – estado fresco.....	60
Figura 4.6 - Consistência obtida por espalhamento (mm) e respectiva recta de regressão linear das argamassas da família das misturas binárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a consistência obtida por espalhamento em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC ou de resíduo de pedra natural). .....	62
Figura 4.7 - Consistência obtida por espalhamento (mm) e respectiva recta de regressão linear das argamassas da família das misturas ternárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a consistência obtida por mesa de espalhamento, em função da percentagem de incorporação de resíduos).....	63
Figura 4.8 - Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) das argamassas das misturas estudadas – estado fresco. ....	64
Figura 4.9 - Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) e respectivas rectas de regressão linear das argamassas da família das misturas binárias – estado fresco. (A recta representada, e a respectiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC. A tracejado está representada a linha de tendência entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduo de pedra natural, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ ))...65	65
Figura 4.10 - Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) das argamassas da família das misturas ternárias. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduos – estado fresco. A tracejado está representada a linha de tendência entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduos de 30%, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).....	67
Figura 4.11 - Teor de ar (%) das argamassas das misturas estudadas – estado fresco. ....	68
Figura 4.12 - Teor de ar (%) das argamassas da família das misturas binárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC ou de resíduo de pedra natural). .....	69
Figura 4.13 - Relação entre o teor de ar (%) e a massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) das argamassas da família das misturas binárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC ou de resíduo de pedra natural).....	70

Figura 4.14 - Teor de ar (%) das argamassas da família das misturas ternárias. (A recta representada, e a respectiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou entre o teor de ar em função da incorporação de 20% de resíduos. A tracejado estão representadas as linhas de tendência entre o teor de ar em função da incorporação de 25 e 30% resíduos, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )). .....71

Figura 4.15 - Relação entre o teor de ar (%) e a massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) das argamassas da família das misturas ternárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica e o teor de ar em função da percentagem de incorporação de resíduos. A tracejado está representada a linha de tendência entre a massa volúmica e o teor de ar, em função da percentagem de incorporação de resíduos de 25%, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )). .....72

Figura 4.16 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos – estado endurecido. ....73

Figura 4.17 - Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos das misturas da família de referência. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função do tempo de hidratação). .....75

Figura 4.18 - Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função do tempo de hidratação). .....76

Figura 4.19 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliadas em provetes prismáticas das misturas consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC). .....77

Figura 4.20 - Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função do tempo de hidratação). .....78

Figura 4.21 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos das misturas consoante teor de substituição de cimento por pedra natural calcária – estado endurecido (família de misturas binárias). (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função da percentagem de incorporação de resíduo de pedra natural).....	79
Figura 4.22 - Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos da família das misturas ternárias – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função do tempo de hidratação). .....	80
Figura 4.23 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos – estado endurecido. ....	83
Figura 4.24 - Evolução da tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas da família de referência – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação). .....	83
Figura 4.25 - Evolução da tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação). .....	85
Figura 4.26 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas apresentadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação). .....	86
Figura 4.27 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a resistência à flexão em função da percentagem de incorporação de resíduo de FCC. A tracejado está representada a linha de tendência entre a resistência à flexão, em função da percentagem de incorporação de resíduos, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )). .....	87
Figura 4.28 - Evolução da tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária	

(família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação). .....	88
Figura 4.29 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticas das misturas, consoante teor de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a resistência à flexão em função da percentagem de incorporação de resíduo de pedra natural). .....	89
Figura 4.30 - Evolução da tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos da família das misturas ternárias. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a tensão de rotura à flexão em função do tempo de hidratação). 90	90
Figura 4.31 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos – estado endurecido. ....	92
Figura 4.32 - Evolução da tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas da família de referência. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à compressão em função do tempo de hidratação). ....	93
Figura 4.33 – Evolução da tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticas das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação). ....	95
Figura 4.34 - Tensão média de rotura à compressão média (MPa), avaliada em provetes prismáticos, das misturas consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas apresentadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à compressão em função do tempo de hidratação). ....	96
Figura 4.35 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas, consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a resistência à compressão em função da percentagem de incorporação de resíduo de FCC. A tracejado está representada a linha de tendência entre a resistência à compressão, em função da percentagem de incorporação de resíduos, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )). ....	97

Figura 4.36 – Evolução da tensão de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à compressão em função do tempo de hidratação).	.99
Figura 4.37 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas, consoante teor de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a resistência à compressão em função da percentagem de incorporação de resíduo de pedra natural).	.....100
Figura 4.38 - Evolução da tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos da família de misturas ternárias – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a tensão de rotura à flexão em função do tempo de hidratação).	.....102
Figura 4.39 - Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ ) das misturas estudadas – estado endurecido.	.....105
Figura 4.40 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, das misturas da família de referência – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido).	.....106
Figura 4.41 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm), determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, para as argamassas das misturas da família de referência – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido. A tracejado está representada a linha de tendência para a mistura de referência - 100C(+SP) - cujo ajuste não foi estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).	.....107
Figura 4.42 - Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ ) das argamassas da família das misturas binárias. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre o coeficiente de capilaridade em função da percentagem de incorporação de resíduos de FCC ou de pedra natural calcária, respectivamente).	.....108
Figura 4.43 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família de misturas binárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de	

2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido).....	108
Figura 4.44 - Ascensão da franja líquida média (cm) determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido. A tracejado está representada a linha de tendência para a mistura de referência - 100C(+SP) - cujo ajuste não foi estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )). .....	109
Figura 4.45 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família de misturas binárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido). .....	110
Figura 4.46 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm) determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido. A tracejado está representada a linha de tendência para a mistura de referência - 100C(+SP) - cujo ajuste não foi estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).....	110
Figura 4.47 - Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ ) das argamassas da família das misturas ternárias. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre o coeficiente de capilaridade em função da percentagem de incorporação de resíduos).....	111
Figura 4.48 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com substituição de 20% de cimento por resíduos sólidos industriais (família de misturas ternárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido). .....	112
Figura 4.49 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm), determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com substituição de 20% de cimento por resíduos sólidos industriais (família das misturas ternárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e	

respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido).....	113
Figura 4.50 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, com substituição de 25% de cimento por resíduos sólidos industriais (família de misturas ternárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido). ....	113
Figura 4.51 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm) determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, com substituição de 25% de cimento por resíduos sólidos industriais (família das misturas ternárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido). ....	114
Figura 4.52 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com substituição de 30% de cimento por resíduos sólidos industriais (família de misturas ternárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido). ....	114
Figura 4.53 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm) determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com substituição de 30% de cimento por resíduos sólidos industriais (família das misturas ternárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido).....	115



# LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

## ALFABETO LATINO

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área	mm <sup>2</sup>
b	Largura	mm
c	Coeficiente de absorção de água por capilaridade	kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
cv	Coeficiente de variação	%
d	Distância; idade	m; dias
d <sub>i</sub>	Diâmetro de espalhamento	mm
e	Espessura	mm
F	Força	N
HR	Humidade Relativa	%
M	Massa	kg
N	Número de amostras ensaiadas	--
n	Dimensão da amostra	--
R	Resistência	MPa ou N/mm <sup>2</sup>
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinação (quadrado do coeficiente de correlação)	--
S	Área superficial	m <sup>2</sup>
s	Desvio padrão	--
s <sup>2</sup>	Variância	--
T	Temperatura	°C
t	tempo	s, min, h
V	Volume	m <sup>3</sup>

## ALFABETO GREGO

Símbolo	Descrição	Unidade
Δ	Variação	--
∅	Diâmetro	mm
ρ	Massa volúmica	kg/m <sup>3</sup>

## ÍNDICES INFERIORES

Símbolo	Descrição
c	Compressão

f	Flexão; fim de presa
i	Início de presa
m	Valor médio
máx	Valor máximo
min	Valor mínimo

## NOTAÇÃO ABREVIADA ADOPTADA NA QUÍMICA DO CIMENTO

Abreviatura	Descrição
$C\bar{S}H_2$	Gesso hidratado
$C_2S$	Silicato bicálcico ou belite
$C_3A$	Aluminato tricálcico
$C_3S$	Silicato tricálcico
$C_4AF$	Aluminoferrato tetracálcico
CH	Hidróxido de cálcio ou portlandite
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado

## SIGLAS

Siglas	Descrição
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEM	Cimento corrente
CEN	Areia normalizada de referência
CIMPOR	Empresa: Cimentos de Portugal
D	Sílica de fumo
E	Especificação
EN	Norma Europeia
UE	União Europeia
FCC	Catalisador do “ <i>cracking</i> ” catalítico em leito fluidizado
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GESTIN	Associação Gestora de Inertes
GPL	Gás de petróleo liquefeito
HFC	Hidrofluorcarbonetos
IA	Índice de actividade
IPQ	Instituto Português da Qualidade

---

ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
K	Clínquer
L, LL	Calcário
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
P,Q	Materiais pozolânicos
PFCs	Perfluorcarbonetos
r.p.m.	Rotações por minuto
S	Escória granulada de alto forno
SNL	<i>Société Nouvelle du Littoral</i>
SP	Superplastificante
TFM	Trabalho Final de Mestrado
U.S.	Ultra-sons
V,W	Cinzas volantes
WBSCD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
X	Xisto cozido

---



## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente Trabalho Final de Mestrado (TFM) constitui o documento que apresenta o trabalho desenvolvido durante o período de Janeiro a Outubro, sob a orientação da Professora Coordenadora Carla Costa, que visa a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de especialização de Edificações.

Esta dissertação insere-se no Projecto de Investigação, em curso, cuja instituição preponente é o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) e que tem por objectivo último o desenvolvimento de novos materiais à base de cimento com incorporação de catalisador exausto proveniente da indústria petroquímica. Este projecto tem como parceiros o Instituto Superior Técnico, a *University Texas at Austin* e a Petrogal, sendo financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do Projecto (Ref.<sup>a</sup> PTDC/ECM/113115/2009) “ECO-Zement: Reutilização do resíduo de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado da refinação de petróleo em materiais de base cimentícia”.

## 1.2. ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

A indústria cimenteira tem estado no centro do debate das alterações climáticas, isto, porque a produção do cimento é um processo com elevado impacto ambiental, especialmente, por requerer a utilização de quantidades significativas de recursos naturais, ser energeticamente intenso e contribuir para a emissão de elevadas taxas de CO<sub>2</sub> [2,3,4].

Neste sentido, a comunidade científica identificou a importância de avaliar a possibilidade da substituição parcial do cimento por outros produtos cimentícios, contribuindo, em concomitância, para a: diminuição do impacto ambiental associado à produção de cimento; mitigação da produção de resíduos sólidos; e melhoria tecnológica dos produtos de base cimentícia [5,6].

O catalisador exausto do “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (FCC) é um dos resíduos da indústria petrolífera com potencial de reutilização na qualidade de material cimentício suplementar [7,8,9]. No entanto, a sua aplicação prática carece do aumento de conhecimento fundamental.

### **1.3. OBJECTIVO DO TRABALHO**

Esta dissertação tem por objectivo contribuir para o desenvolvimento de novos materiais que visem a diminuição da dependência do consumo de cimento, estudando a utilização de misturas com substituição parcial deste por resíduos sólidos industriais, no caso, por catalisador exausto de FCC e resíduos de pedra natural calcária, de forma a quantificar a sua viabilidade e utilização generalizada na construção, nomeadamente, a eficiência face a vários parâmetros de desempenho.

Pretende-se comparar as propriedades dos cimentos com diferentes fracções volúmicas de resíduo(s) incorporado(s) com as propriedades do cimento corrente, assim como, contribuir para a correspondência de misturas, constituídas por cimento corrente e um (ou dois) resíduo(s) sólido(s) industrial(ais), com os requisitos (mecânicos, físicos, químicos e de durabilidade) e com os critérios de conformidade aos quais os cimentos e seus constituintes devem respeitar para serem certificados e que estão especificados na norma NP EN 197-1 [1].

Pretende-se, também, avaliar a existência de ganhos adicionais nas misturas constituídas por cimento e pelos resíduos em estudo, comparando a variação da eficiência para várias percentagens de substituição de forma a verificar a complementaridade destes dois resíduos.

### **1.4. ABORDAGEM METODOLÓGICA**

Neste Subcapítulo descrevem-se, de forma clara e concisa, as metodologias e técnicas adoptadas para a possível concretização desta investigação, com os objectivos atrás referidos.

Numa fase inicial procedeu-se à recolha de informação (fontes nacionais e internacionais) de modo a obter-se um esclarecimento global sobre o tema em questão, reunir os instrumentos necessários à planificação das actividades experimentais e ganhar sensibilidade para posterior análise dos resultados.

Na fase seguinte, e com base nos elementos bibliográficos existentes, definiu-se o plano de ensaios a realizar, em concordância com as normas em vigor, tendo havido a preocupação de se estabelecer os parâmetros a variar nas composições testadas.

Após o provisionamento de todo o material, necessário ao trabalho experimental, deu-se início à realização das actividades. Numa etapa inicial procedeu-se à separação granulométrica das areias e à produção de argamassas teste, até se verificar a reprodutibilidade do operador nas diferentes actividades experimentais.

A campanha experimental incluía a preparação de:

- (i) Amostras de referência, apenas com o cimento corrente com e sem incorporação de superplastificante, com as quais se avalia: o comportamento das misturas, em consequência da adição de superplastificante; e, as alterações introduzidas pela incorporação de resíduos;
- (ii) Pastas de cimento com diferentes fracções volúmicas de resíduo de FCC e pedra natural calcária incorporados, em substituição parcial de cimento, de modo a observar a influência da incorporação de resíduos nos tempos – início e fim – de presa;
- (iii) Argamassas para todas as misturas com as quais se determinam as propriedades no estado fresco – trabalhabilidade, massa volúmica e teor de ar – e no estado endurecido – velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, resistência mecânica (flexão e compressão) e absorção de água por capilaridade.

Efectuou-se o tratamento, análise e discussão cuidada dos resultados experimentais tendo em consideração as diferentes misturas de cimento com incorporação de resíduos, preparadas em função: (i) da natureza do(s) resíduo(s) incorporado(s); (ii) da fracção volúmica de cimento substituído; e (iii) do tempo de hidratação.

Este trabalho de investigação culminou com a redacção da presente dissertação, tendo sido compiladas e organizadas em texto: as informações, os resultados, as análises, as discussões e as conclusões.

## **1.5. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação apresentada compreende cinco capítulos resumindo-se, em seguida, os principais assuntos abordados em cada um deles.

No primeiro e presente Capítulo efectua-se a contextualização do tema, enunciam-se os motivos impulsionadores e os principais condicionantes deste trabalho, descreve-se a metodologia adoptada, o modo como foi organizada toda a informação e expõe-se a distribuição das várias partes do trabalho.

Segue-se o Capítulo remetente à revisão da literatura (Capítulo 2), resultado de uma pesquisa bibliográfica extensa sobre temas com relevo para o âmbito do trabalho, na qual se efectua um enquadramento da problemática, que esteve na origem desta investigação, nomeadamente, os impactos ambientais gerados pela indústria do cimento. Apresenta-se o objecto de estudo (cimento), caracteriza-se e fundamenta-se a escolha dos resíduos industriais sólidos a serem utilizados como substitutos parciais do mesmo. Por fim, expõem-se as principais contribuições e conclusões dos vários autores e experimentadores relacionados com a temática da dissertação.

O terceiro Capítulo apresenta a campanha experimental desenvolvida para dar cumprimento aos objectivos estabelecidos. Neste expõe-se o plano de ensaios, definem-se os constituintes das composições estudadas e descrevem-se os fundamentos teóricos, materiais e procedimentos adoptados, associados a cada ensaio.

O quarto Capítulo dedica-se à apresentação, análise e discussão de resultados, alcançados durante o trabalho experimental, figurando o Capítulo mais influente de toda a dissertação. Neste caracterizam-se as misturas, ao nível das propriedades mecânicas e físicas do material, sustentadas por elementos gráficos e quadros, que permitem observar o comportamento das composições ao longo do tempo e estabelecer correspondências entre as misturas e os diversos ensaios realizados. Os resultados foram analisados conjuntamente com os dados obtidos nos estudos de outros autores.

O quinto e último Capítulo alude às conclusões, no qual, após a análise crítica da prestação das composições estudadas, se enunciam as contribuições do trabalho realizado, adequando aos objectivos traçados inicialmente. São também apresentadas propostas, tendo em vista o desenvolvimento de estudos futuros neste domínio.

## 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos a questão das mudanças climáticas concentrou o foco de discussões de carácter ambiental. Dos vários problemas ambientais, um dos mais presentes é o aquecimento global [10].

Existem correntes científicas que relacionam o aquecimento do Planeta com o aumento da emissão dos gases com efeito de estufa (GEE) [11] e consequente acumulação destes poluentes na atmosfera. Os gases que contribuem para o efeito de estufa, cujos limites de emissão foram balizados pelo Protocolo de Quioto [12], são: o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), os hidrofluorcarbonetos (HFC), os perfluorcarbonetos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ). De entre os GEE apresentados tem sido dada, especial, relevância ao papel do  $\text{CO}_2$ . Dado que este estudo pretende contribuir para o desenvolvimento de materiais que conduzam a menores emissões de  $\text{CO}_2$  (como se verá com mais rigor no Subcapítulo 2.4), é relativamente a este que surgirão mais detalhes.

A Figura 2.1 apresenta, numa escala temporal, a evolução da concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera. Segundo o observado verifica-se uma correspondência entre o aumento da temperatura e a acumulação deste gás, tendo esta concentração atingido valores mais elevados recentemente.

Com a consciencialização dos problemas de índole ambiental, o Homem passou a desempenhar um papel influente sobre as mudanças climáticas o que conduziu à assinatura, entre diversos estados, do Protocolo de Quioto [13], adoptado na Conferência Internacional pela Prevenção do Aquecimento Global (1997). Este Protocolo visa contribuir para o desenvolvimento sustentável, tendo a Europa, em particular, assumido o compromisso de reduzir as emissões de GEE de 8%, em relação às verificadas em 1990, durante o período de 2008 a 2012 [14,15].

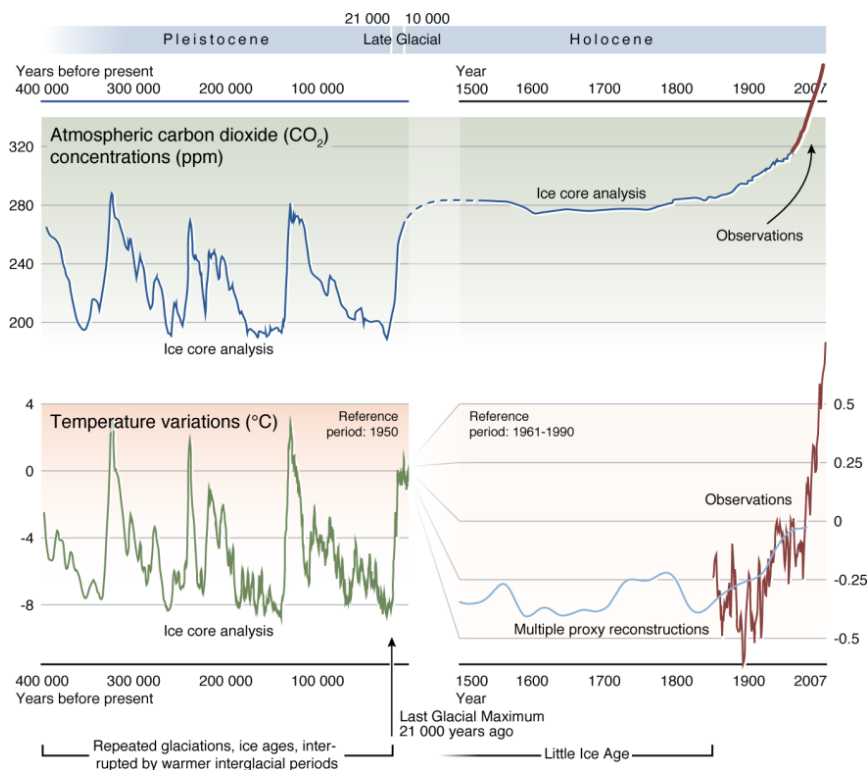


Figura 2.1 - Perspectiva cronológica da concentração de dióxido de carbono e da variação da temperatura na atmosfera, extraído de [16].

## 2.2. IMPACTOS AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO

### 2.2.1. A INDÚSTRIA DO CIMENTO NO CENÁRIO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O sector da construção pode ter um contributo expressivo no cumprimento do Protocolo de Quioto, visto ser uma actividade que consome, a nível mundial, mais matérias-primas do que qualquer outro sector. Acresce, ainda, o facto de ser responsável por 30% das emissões de CO<sub>2</sub> e grandes quantidades de resíduos sólidos gerados [17].

Incluída no sector da construção, a indústria do cimento tem um impacto ambiental significativo, uma vez que consome quantidades expressivas de: recursos naturais não-renováveis, nomeadamente, calcário e argila; de energia combustível e eléctrica; e é, também, responsável por grandes quantidades de emissões de gases [18], particularmente CO<sub>2</sub>, como se explica, posteriormente, na Secção 2.2.2. Outra questão relevante é que o impacto ambiental, desta indústria, se verifica à escala global, sendo o cimento produzido em quase todos os países (pois a principal matéria-prima, o calcário, é uma rocha abundante em praticamente todo o Mundo [11]) e se prevê que o consumo, particularmente nos países em desenvolvimento, aumente nas próximas décadas (Figura 2.2) [19].

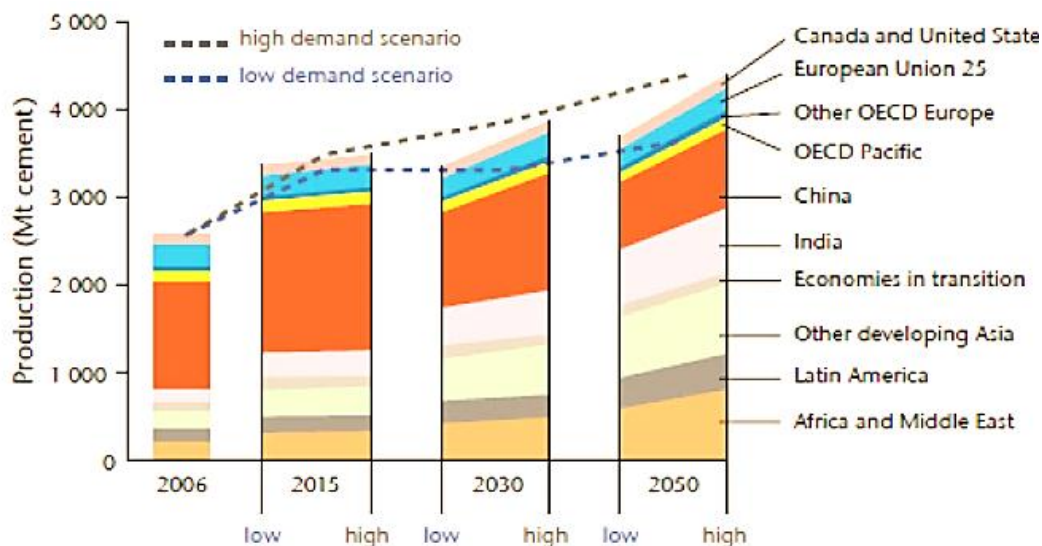


Figura 2.2 - Consumo global de cimento, extraído de [20].

### 2.2.2. PRODUÇÃO DE CIMENTO E POSSÍVEIS MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO SEU IMPACTO AMBIENTAL

Nesta Secção descreve-se o processo de produção de cimento, colocando em evidência as principais fontes dos impactos ambientais deste (referidos na Secção 2.2.1). Pretende-se, deste modo, facilitar a compreensão das diferentes medidas que se podem implementar para minimizar os impactos desta indústria e, em particular, permitir a compreensão científica, tecnológica e ambiental da medida para a qual se pretende contribuir neste trabalho, que é concretamente, a substituição parcial de cimento por subprodutos de outras indústrias.

A Figura 2.3 representa um esquema geral de uma fábrica de cimento, relativamente à qual se apresentará, de seguida, uma descrição sucinta do actual processo de produção [21,22,23,24]:

- (i) Como referido, na Secção 2.2.1, as matérias-primas usadas [24] são o calcário (cerca de 75%) e a argila (cerca de 25%), cuja exploração é realizada em pedreiras, normalmente, a céu aberto. O arranque da pedra pode ser mecânico ou por recurso a explosivos. Após a extracção recorre-se a britadores, de forma a reduzir o tamanho dos blocos a uma granulometria adequada (“Pedreira”, Figura 2.3);
- (ii) As matérias-primas seleccionadas são, depois, doseadas (sendo, eventualmente, a sua composição corrigida recorrendo a outros materiais como, por exemplo, areia e gralha) de forma a garantir que os teores dos compostos químicos presentes são adequados ao cimento que se pretende produzir. A mistura é transportada para um moinho onde é finamente moída e assume a designação de “cru” ou “farinha” (“Moagem de Cru”, Figura 2.3);

- (iii) A transformação das matérias-primas em silicatos e aluminatos de cálcio, principalmente, silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o aluminoferrato tetracálcico ( $C_4AF$ ), realiza-se, sobretudo, num forno cilíndrico horizontal, animado de movimento rotacional lento, onde a temperatura atinge os  $1450^{\circ}C$  (“Cozedura”, Figura 2.3). Durante esta fase ocorrem diversas reacções químicas, a partir das quais se obtém um produto que se denomina “clínquer”. A elevação da temperatura é conseguida através da combustão de carvão, coque de petróleo e outros combustíveis secundários. Após a formação do clínquer, inicia-se o processo do seu arrefecimento brusco, importante na determinação da sua composição mineralógica, que tem influência nas propriedades do produto final, bem como, na recuperação parcial da energia térmica;
- (iv) O cimento é o produto que se obtém da moagem fina de clínquer com gesso (3 a 8%, em massa). Nesta fase (“Moagem do Cimento”, Figura 2.3) podem ainda ser incorporadas adições como cinzas volantes, pozolanas naturais, escórias de alto forno e calcário. Se estas adições estiverem presentes em mais de 5% em massa são consideradas, à luz da norma NP EN 197-1 [1], constituintes principais do cimento (Secção 2.3.1);
- (v) O cimento produzido é ensacado, sendo, posteriormente, expedido desta forma ou disponibilizado, na forma de granel, directamente do silo para camiões-cisterna, cisternas para transporte ferroviário ou para navios de transporte de cimento, de acordo com as respectivas necessidades e acessibilidades (“Expedição”, Figura 2.3).

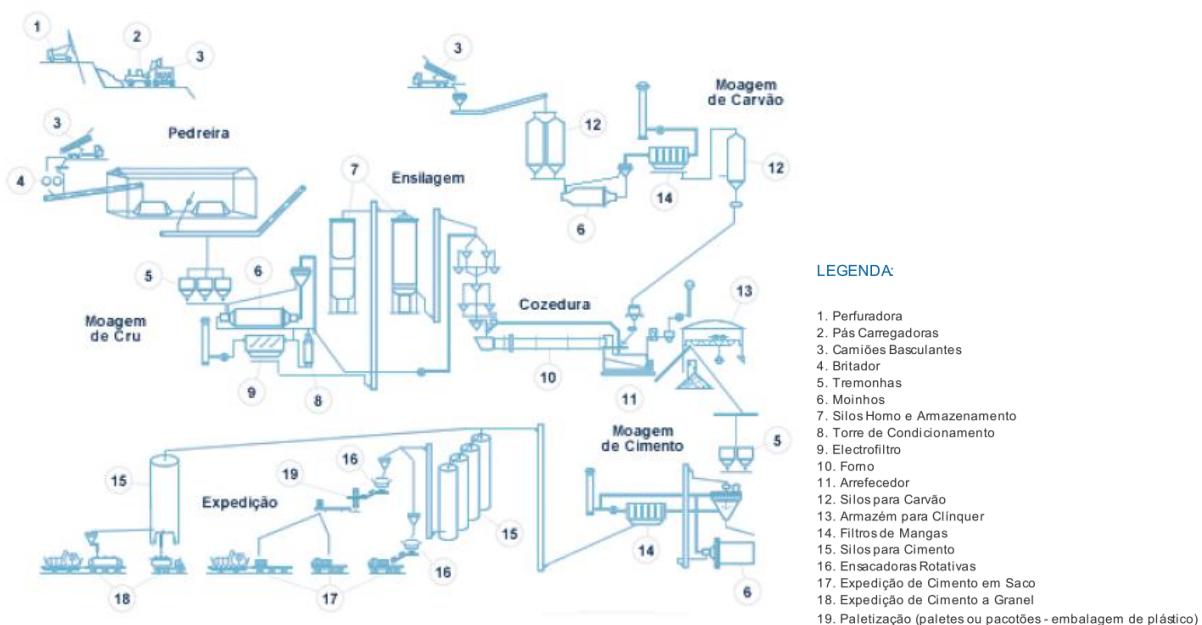


Figura 2.3 - Esquema geral do processo de produção de cimento, extraído de [22].

Se, por um lado, a actividade normal das fábricas e respectivas pedreiras apresenta uma faceta positiva na criação de postos de trabalho, no desenvolvimento socioeconómico local, no fornecimento de produtos e prestação de serviços à sociedade [24], esta actividade, também, afecta negativamente o ambiente. De seguida, sistematizam-se os principais impactos ambientais associados à produção de cimento:

- (i) Consumo de recursos naturais não-renováveis: Estima-se que por cada tonelada de cimento produzida está associada a utilização de cerca de duas toneladas de recursos naturais, nomeadamente, calcário e argila [25]. Durante a fase de exploração de uma pedreira há, ainda, outros impactes decorrentes da transformação da paisagem, resultantes da remoção do coberto vegetal e de matérias-primas, que podem originar a emissão de poeiras e de materiais sólidos solúveis e insolúveis, gerar vibrações e ruído, com consequências nefastas sobre o meio ambiente, em particular, sobre os ecossistemas e biodiversidade. Refere-se, ainda, que devido à exploração a céu aberto de grandes áreas, o impacto visual torna-se significativo [24];
- (ii) Consumo de energia combustível e eléctrica: A produção de cimento está associada à combustão de quantidades significativas de combustíveis fósseis não-renováveis (sobretudo, carvão, coque de petróleo e gás natural). Estima-se que a indústria cimenteira consuma entre 0,2 a 3,5 GJ de energia por cada tonelada de clínquer produzida [26];
- (iii) Emissão de GEE, particularmente de CO<sub>2</sub>: O CO<sub>2</sub> emitido tem duas origens diferentes. Por um lado, o “CO<sub>2</sub> de processo” resultante do processo de descarbonatação de matérias-primas, nomeadamente, do calcário ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Por outro, o “CO<sub>2</sub> térmico” resultante da combustão do combustível usado no forno (coque de petróleo, carvão, gás natural ou outro) e da utilização de energia eléctrica e transportes [24]. Estima-se que, durante a produção de uma tonelada de clínquer, é emitida cerca de uma tonelada de CO<sub>2</sub> [17,10,27]. Tendo em consideração a produção generalizada de cimento no Mundo, a indústria cimenteira é responsável pela quota-parte de 5 a 7% de emissão antropogénica mundial de CO<sub>2</sub> [24,11,10]. Para além deste gás, a indústria do cimento emite outros poluentes para o ambiente circundante, como é o caso dos poluentes principais (partículas NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>) que contribuem, igualmente, para o aquecimento global [27,24].

Enumeram-se, de seguida, as principais alternativas para minimização dos impactos ambientais associados à produção de cimento:

- (i) Na exploração das pedreiras devem ser utilizadas práticas e meios de exploração menos agressivos ao ambiente [24]. Adicionalmente deve recorrer-se, de forma viável, à substituição parcial de matérias-primas não renováveis por subprodutos de outras indústrias contribuindo

para a redução do volume de exploração de recursos naturais; e, eventualmente, para a diminuição das emissões directas de CO<sub>2</sub>, associadas ao processo de descarbonatação [24], se, estes materiais, apresentarem uma composição química adequada e alguns dos seus compostos na forma descarbonatada. As principais matérias alternativas utilizadas são: cinzas volantes, gesso industrial de dessulfuração e cinzas de cinzeiro provenientes de centrais termoeléctricas; cinzas de pirite originadas na produção de ácido sulfúrico; estéril de minas de carvão; refractários usados e poeiras de electrofiltro provenientes dos fornos de clínquer; bauxite proveniente da indústria transformadora; escórias não granuladas da indústria siderúrgica; e calcário oriundo da indústria de fosfatos [24];

(ii) Recurso a combustíveis alternativos com menor impacto ambiental e de elevado conteúdo energético, como: pneus, resíduos de borracha, óleos usados, misturas homogéneas de resíduos industriais, solventes e resíduos de carvão vegetal [18,24,28];

(iii) Redução do rácio clínquer/cimento que consiste, na prática, na substituição parcial do clínquer por outros materiais que podem, também, ser subprodutos de outras indústrias [27].

A substituição do clínquer [11] pode, em determinadas circunstâncias, representar uma boa alternativa do ponto de vista económico relativamente às matérias convencionais, devido, não só ao encargo que representam para algumas indústrias que os geram, mas também, à enorme flexibilidade do sector cimenteiro em incorporá-las no processo de fabrico. Se esta medida se realizar durante o processo de produção do cimento, a substituição ocorre durante a fase da “moagem do cimento” (Figura 2.3) (ou logo a seguir, dependendo da granulometria dos materiais), adicionando ao gesso e ao clínquer o(s) material(ais) que o substitui(em); ou na preparação dos materiais à base de cimento, substituindo-se parcialmente o cimento por outro(s) material(ais).

É neste contexto que se insere este trabalho, que pretende avaliar a possibilidade da substituição parcial do cimento por resíduos de outras indústrias (Subcapítulo 2.4).

### 2.3. CIMENTOS CORRENTES

Nesta Secção apresenta-se o material objecto de estudo desta dissertação – o cimento. Pretende-se, assim, conhecer as propriedades que o tornam apto a ser utilizado na construção e compreender as fases de endurecimento do mesmo, fornecendo as bases de compreensão para as modificações deste material, com que este trabalho pretende contribuir.

### 2.3.1. DEFINIÇÃO, COMPOSIÇÃO E REQUISITOS

O cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecer, conserva a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água [1].

O cimento para ser comercializado nos países da União Europeia (UE), incluindo Portugal, tem que ser certificado pela marca de qualidade CE e, para isso, todos os seus constituintes têm que respeitar a composição, os requisitos (mecânicos, físicos, químicos e de durabilidade) e os critérios de conformidade especificados na norma NP EN 197-1 [1]. Os cimentos que estejam conforme esta norma designam-se “cimentos correntes”, abreviadamente CEM. Em termos de composição existem 27 produtos da família dos cimentos correntes agrupados em cinco tipos principais (Quadro 2.1):

- (i) CEM I: Cimento Portland;
- (ii) CEM II: Cimento Portland composto;
- (iii) CEM III: Cimento de alto forno;
- (iv) CEM IV: Cimento pozolânico;
- (v) CEM V: Cimento composto.

Consideram-se constituintes principais os materiais inorgânicos especialmente seleccionados e utilizados numa percentagem superior a 5%, em massa, em relação à soma de todos os constituintes (tanto os principais como os adicionais minoritários). Apresenta-se, em seguida, algumas definições que facilitam a compreensão dos constituintes principais dos cimentos correntes (Quadro 2.1).

- (i) Clínquer do cimento Portland (K), referido na Secção 2.2.2;
- (ii) Escória granulada de alto forno (S) que resulta do arrefecimento rápido de uma escória fundida, de composição apropriada, com a obtida da fusão do minério de ferro, num alto forno;
- (iii) Sílica de fumo (D) proveniente da redução de quartzo de elevada pureza com carvão em fornos de arco eléctrico na produção de ligas de silício e de ferro-silício;
- (iv) Materiais pozolânicos (P,Q) são substâncias naturais de composição siliciosa e/ou silico-aluminosa;
- (v) Cinzas volantes (V, W) obtidas por precipitação electrostática ou separação mecânica das poeiras dos gases de combustão das fornalhas alimentadas com carvão pulverizado;
- (vi) Xisto cozido (T), material natural activado num forno especial a temperaturas de cerca de 800°C;

## (vii) Calcário (L, LL).

Quadro 2.1 - Os 27 produtos da família de cimentos correntes, extraído de [1].

Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente)		Composição (percentagem em massa <sup>a</sup> )										Constituintes adicionais minoritários
		Constituintes principais										
		Clinker K	Escória de alto forno S	Sílica de fumo D <sup>b</sup>	Pozolana		Cinza volante		Xisto cozido T	Calcário		
					natural P	natural calcificada Q	silícios a V	calcária W		L	LL	
Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de escória	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de pozolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de cinza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
Cimento Portland composto <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-94	<----- 6-20 ----->									0-5
	CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->									0-5
Cimento de alto forno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento pozolânico <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	-	<----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5
	CEM IV/B	45-64	-	<----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5
Cimento composto <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5
	CEM V/B	20-38	31-50	-	<----- 31-50 ----->			-	-	-	-	0-5

Os constituintes adicionais minoritários (ex.: óxido de cálcio, óxido de silício, óxido de alumínio, óxido de ferro, água e trióxido de enxofre) são materiais inorgânicos, especialmente seleccionados e utilizados numa percentagem inferior a 5%, em massa, em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários [29].

De entre os cimentos correntes apresentados (Quadro 2.1), o mais utilizado é o cimento Portland (CEM I). Este é comercializado na forma de grãos com dimensões entre 1 e 90  $\mu\text{m}$  [30] e com a constituição típica [21] que se apresenta no Quadro 2.2.

**Quadro 2.2 - Compostos principais do cimento Portland, adaptado de [29].**

Nome do Composto	Composição	Abreviatura	Porcentagem
Silicato tricálcico ou Alite(*)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	20-80%
Silicato bicálcico ou Belite(*)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	10-55%
Aluminato tricálcico (*)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	0-15%
Aluminoferrato tetracálcico (*)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	5-15%

(\*) - Minerais na forma pura

### 2.3.2. HIDRATAÇÃO

A mistura dos grãos de cimento com a água desencadeia um conjunto de reacções químicas de hidratação [31] interdependentes, dos seus diferentes constituintes, que ocorrem a velocidades diferentes conduzindo a alterações químicas, físicas e mecânicas do sistema [29]. Apresentam-se, de seguida, sob forma de equação, escritas segundo notação abreviada, as reacções químicas dos principais compostos [21].



Sendo que, na química do cimento, o:  $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$  é o gesso hidratado, com fórmula química  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; o  $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{32}$  tem fórmula química  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  que se apresenta, frequentemente, como C-S-H uma vez que, estes compostos químicos formados na hidratação dos silicatos de cálcio presentes no clínquer, são estruturalmente equivalentes, mas apresentam composições químicas variáveis; o  $\text{AH}_3$  é o hidróxido de alumínio que apresenta fórmula química  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; e, finalmente, o CH é o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH}_2)$ .

No curso destas reacções de hidratação do cimento Portland, os grãos de cimento anidro iniciais vão originando produtos hidratados e hidróxido de cálcio, que aderem uns aos outros, formando uma matriz porosa que confere ao cimento propriedades coesivas e adesivas, proporcionando o aumento da rigidez e da resistência do material [29]. À escala macroscópica, o processo de hidratação conduz à conversão da suspensão água-cimento numa matriz sólida – microscopicamente heterogénea e porosa – que serve de ligante nos materiais de base cimentícia [30].

## 2.4. SUBSTITUTOS PARCIAIS DO CIMENTO

Como se referiu anteriormente (Secção 2.2.2) uma das medidas possíveis para diminuir o impacto ambiental, associado à produção de cimento, é substituir parcialmente o cimento por outros materiais, que podem ser recursos naturais ou subprodutos de outras indústrias. Os cimentos formados parcialmente com outros materiais apresentam, evidentemente, benefícios ambientais, de entre os quais se destacam os seguintes:

- (i) Diminuição da necessidade energética (combustível e eléctrica) de produção do clínquer;
- (ii) Redução da poluição, provocada pela emissão de CO<sub>2</sub>, associada à produção de cimento;
- (iii) Minoração da quantidade de recursos naturais consumidos.

Adicionalmente, os cimentos com estas incorporações, podem proporcionar ganhos de desempenho e de durabilidade, comparativamente ao cimento sem substituição parcial deste, dos produtos finais em que são utilizados – argamassas, betões e caldas – como seja: melhor trabalhabilidade; incremento da resistência a certas agressões de natureza química por sulfatos e maior resistência a reacções sílica-alcális.

A substituição parcial de clínquer por outros materiais está prevista nos cimentos correntes - CEM II a CEM V - (Quadro 2.1) e as vantagens ambientais, tecnológicas e económicas têm contribuído para o progressivo aumento da sua utilização no mercado europeu.

Sob ponto de vista de reactividade química os materiais substitutos do clínquer podem classificar-se em minerais e materiais cimentícios [21,32,33].

Os minerais são, em geral, quimicamente inertes e referidos tipicamente como “*fillers*”, em referência aos seus efeitos físicos, por preencherem os poros nos materiais à base de cimento endurecidos completando a curva granulométrica dos agregados finos dos materiais à base de cimento. O calcário que corresponda aos requisitos especificados na norma NP EN 197-1 [1] pode ser incorporado como constituinte principal nos cimentos correntes.

Relativamente aos materiais cimentícios, são materiais que participam em reacções de hidratação formando quantidades adicionais de silicatos e/ou aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H e C-A-H). Estes materiais podem agrupar-se em:

- (i) Ligantes hidráulicos latentes constituídos por silicatos e aluminatos de cálcio que endurecem, espontaneamente, por reacção com a água, mas cuja reacção só se torna significativa na presença de um activador alcalino, como o hidróxido de cálcio;

(ii) Materiais pozolânicos ou pozolanas, que ainda se distinguem em pozolanas naturais e artificiais [33]. As pozolanas são compostos siliciosos ou aluminossilicatos que reagem, à temperatura ambiente, na presença de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), originado no processo de hidratação dos compostos do cimento, para formarem compostos de silicato e aluminato de cálcio, desenvolvendo a resistência. Portanto, uma pozolana reage com hidróxido de cálcio formando C-S-H, mas estes compostos hidratados não são tão ricos em cálcio como os obtidos na hidratação do cimento Portland, não necessitando de contacto com soluções sobressaturadas de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Como a reacção entre a pozolana e o  $\text{Ca(OH)}_2$  se realiza com um dos componentes – a pozolana – no estado sólido, o estado da sua superfície é determinante para o início da reacção. Além disso, é necessário que a área superficial em contacto com o outro reagente – o hidróxido de cálcio que se encontra dissolvido – seja a maior possível [21].

Dos vários materiais com características pozolânicas destacam-se alguns, já utilizados correntemente, cuja utilização está prevista na norma NP EN 197-1 [1], nomeadamente, a escória granulada de alto forno, a sílica de fumo, os materiais pozolânicos, as cinzas volantes e o xisto cozido [34,31].

(i) Cinzas volantes – subproduto, gerado nas centrais termoeléctricas, caracterizado pela hidratação lenta, estando associado a betões com baixas resistências em idades iniciais. Este material, de características pozolânicas, é utilizado com práticas de substituição inferiores a 40% sendo aceite, por alguns autores, a incorporação deste numa percentagem de cerca de 50%;

(ii) Sílica de fumo – subproduto, resultante da produção de silício das ligas de ferro-silício em fornos eléctricos, que contribui para a densificação da microestrutura do betão tornando-o um material mais resistente e durável.

Têm sido estudados outros materiais cimentícios como, por exemplo, a cinza de casca de arroz [35], as cinzas de lamas de estações de tratamento de água [36], os resíduos da indústria cerâmica e lamas de minas de Tungsténio, lamas de resíduos de papel [37], o vidro reciclado, entre outros [34], cuja viabilidade técnica e económica ainda está a ser apurada e, portanto, ainda não são previstos como constituintes dos cimentos correntes.

#### 2.4.1. RESÍDUO DE CATALISADOR EXAUSTO PETROQUÍMICO

O petróleo bruto é um combustível fóssil composto por diversos tipos de hidrocarbonetos [38], isto é, moléculas constituídas por hidrogénio e carbono. A refinação do petróleo consiste na separação e purificação das diferentes fracções de hidrocarbonetos tirando partido das suas diferenças de

densidade e volatilidade. Neste processo obtêm-se produtos intermédios ou finais, para a produção de combustíveis, como sendo: o gasóleo, o GPL (gás de petróleo liquefeito), o metano, o propano e a nafta, entre outros.

As unidades de “*cracking*” catalítico em leito fluidificado – presentes em algumas refinarias e denominadas, frequentemente, por “unidades de FCC” (do inglês “*Fluid Catalytic Cracking*” [39]) – efectuam a conversão de uma fracção de hidrocarbonetos, separada anteriormente, em moléculas mais leves de gás, gasolina e gasóleo, com maior valor acrescentado [27]. Industrialmente, o processo ocorre a temperaturas relativamente elevadas (480 a 550°C) [40] a pressões próximas da atmosférica (2 a 3 bar) [40] e emprega um catalisador que contém, tipicamente, entre 5 a 40% de zeólito Y disperso numa matriz activa de alumina, sílica ou sílica-alumina [40]. A actividade química, associada à cisão dos hidrocarbonetos, produz coques (compostos poliaromáticos insaturados) que se depositam sobre a superfície do catalisador diminuindo a sua eficiência e conduzindo à necessidade da sua regeneração a elevadas temperaturas, entre os 680 a 750 °C [40]. De modo a ir mantendo a eficiência do processo de “*cracking*” parte do catalisador é substituído, após cada etapa de regeneração, por quantidades equivalentes de catalisador fresco. A parte do catalisador desactivado, retirado do processo (catalisador exausto), contém, na sua composição, teores significativos de alumina e sílica [27]. Neste sentido, a sua reutilização nos materiais de construção à base de cimento pode ser vantajosa, uma vez que se trata potencialmente de um material com características pozolânicas. Refira-se, por curiosidade, que as pozolanas foram muito utilizadas na preparação de argamassas hidráulicas até princípios do século XIX, tendo-se reduzido a sua utilização com a descoberta do cimento Portland artificial [41].

Para além dos benefícios para a indústria cimenteira, originados pela substituição parcial do cimento por resíduos (descritos na Secção 2.2.2), a incorporação deste resíduo inorgânico, com poder calorífico mais elevado [24], trata-se de uma interessante oportunidade de negócio que permite: a valorização energética dos mesmos; a prestação de um serviço seguro à sociedade, no sentido de contribuir para a sustentabilidade ambiental e ecológica do meio; a redução das áreas necessárias para aterro; e além disso, pode proporcionar melhorias nas propriedades dos materiais cimentícios [27]. Ao nível económico, também, apresenta vantagens devido à utilização de resíduos como matéria-prima, conferindo valor económico a materiais que seriam desprezados [27].

Algumas pesquisas realizadas na Polónia [42, 46,], na Espanha [7, 47, 51, 53], em Taiwan [43, 54] e no Brasil [48, 49] apontam o potencial de utilização de resíduos, gerados nas unidades de craqueamento catalítico em leito fluidizado de refinarias, para produção de materiais de construção, principalmente, como substitutos parciais do cimento Portland.

Em relação à utilização do resíduo “*cracking*” catalítico em matriz do cimento destacam-se os principais grupos de pesquisa, no Mundo: a Universidade de Tecnologia Warsaw (Polónia), Universidade Politécnica de Valência (Espanha) e Universidade normal Nacional de Taiwan (Taiwan), Universidade Técnica Nacional de Atenas (Grécia), Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brasil).

A substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC em pastas de cimento pode traduzir-se – particularmente, para percentagens de incorporação baixas de cerca 5% – num processo de hidratação mais exotérmico do que o verificado em pastas sem incorporação de resíduo [42,43,44]. Este aumento de temperatura reflecte-se na aceleração do processo de presa e no aumento da resistência para tempos de hidratação curtos.

Também o tempo de presa pode ser influenciado pela incorporação de catalisador de FCC verificando-se, tipicamente, que o aumento do seu teor diminui o tempo de rigidificação [43] embora haja registos de misturas cimento/catalisador para as quais o tempo de presa é semelhante [45].

Adicionalmente, estudos termogravimétricos [42,44,46,47,48,49,50,51] e de difracção de raios-X [42,46,52,51] em pastas de cimento revelaram que o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ , nas amostras com incorporação de resíduo, é inferior ao teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  nas pastas que não têm resíduo, confirmando a actividade pozolânica deste resíduo. Verifica-se, ainda, que a incorporação de resíduo leva ao aumento da resistência mecânica, particularmente, à compressão tanto aos 7 como aos 28 dias de hidratação das pastas [42,44,46].

O efeito da substituição parcial de cimento por resíduos catalíticos de FCC foi, também, avaliada em argamassas tendo-se apurado conduzir a valores de resistência mecânica à compressão superiores ou inferiores [44] à das argamassas sem catalisador de FCC, dependendo da percentagem de substituição, do tempo de hidratação e do grau de finura dos grãos do resíduo. Dado que as composições químicas destes catalisadores exaustos são diferentes, consoante o processo de *cracking* em que são utilizados, as percentagens de substituição que conduzem, tipicamente, a valores de resistência mais elevados encontram-se entre os 10 a 20% [7,53,43,54].

Verificou-se que o aumento do grau de finura das partículas do catalisador de FCC se traduz num aumento da resistência mecânica dos materiais onde são incorporados [44,7,55].

O aumento da resistência à compressão, na presença catalisadores exaustos de FCC, foi verificada em argamassas [44,7] e betões [46] nos quais o resíduo, em vez de substituir o cimento, substituiu parcialmente o agregado fino concluindo-se que se comporta como um *microfiller* activo. No estudo destes betões averiguou-se que, para teores de adição de 10 e 20% de catalisador de FCC, a

microestrutura do betão torna-se mais compacta verificando-se um aumento da sua densidade e a redução da absorção de água. No betão armado, detectou-se que os catalisadores de FCC não contribuem para a despassivação das armaduras [46].

A incorporação destes resíduos – possuindo elevada área superficial específica – na matriz cimentícia, reflecte-se na perda de trabalhabilidade tanto de argamassas [44,7,43,54] como de betões [46], no estado fresco, tornando-se necessário usar um plastificante ou adicionar mais água à mistura.

#### 2.4.2. RESÍDUO DE PEDRA NATURAL CALCÁRIA

O processamento típico de rochas consiste em duas etapas: na extracção dos blocos nas pedreiras e no seu corte e polimento nas fábricas. Durante a transformação, de modo a torná-las úteis para a sociedade, são produzidas quantidades apreciáveis de resíduos, sob a forma de lamas e pós muito finos, que constituem cerca de 20 a 25% do bloco transformado [56].

As indústrias do sector têm sido citadas, pelos ambientalistas, como fontes de contaminação e/ou poluição do meio ambiente [57], uma vez que estes resíduos são maioritariamente depositados em aterros sanitários, a situação ambientalmente menos preferível. Verifica-se, portanto, a importância do aproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais como forma de mitigar os problemas gerados [56].

A utilização destes resíduos, como subprodutos em materiais à base de cimento, apresenta-se, também, como uma alternativa viável para o aumento de desempenho desses materiais. De entre os vários resíduos de pedras naturais existentes é objecto de estudo, neste trabalho, o resíduo do processamento da pedra natural calcária. Espera-se que os efeitos da incorporação deste resíduo sejam muito semelhantes aos efeitos da substituição parcial de clínquer por calcário natural, como previsto na norma NP EN 197-1 [1], sendo possível a sua utilização para produzir cimentos correntes dos tipos: CEM II/A-L, CEM II/A-LL, CEM II/B-L e CEM II/B-LL (Quadro 2.1). Estes tipos de cimento correspondem, actualmente, a cerca de 60% da quota de mercado na UE [58].

A vantagem adicional da utilização de resíduo calcário nos materiais à base de cimento, em vez de calcário natural, prende-se, sobretudo, com razões ambientais, uma vez que, desta forma, os resíduos são aplicados como subprodutos de outra indústria numa lógica ecológica industrial.

O efeito da incorporação de resíduo de calcário é, essencialmente, físico, porque completa a curva granulométrica dos agregados finos e preenche os poros dos materiais à base de cimento endurecidos contribuindo para a densificação da matriz do cimento e, portanto, para o aumento da

sua resistência [59]. Embora sejam, essencialmente, inertes quimicamente há estudos que referem que os *fillers* podem acelerar a hidratação do cimento Portland, na medida em que funcionam como centros de nucleação das reacções [60,61,62].

Tipicamente, a substituição parcial de cimento por *filler* traduz-se na diminuição da resistência mecânica dos produtos finais, porque o teor de ligante hidráulico diminui, de acordo com o que se designa frequentemente por “efeito de diluição” [62]. No entanto, é possível preparar misturas optimizadas de cimento e calcário com resistências finais idênticas às dos materiais à base de cimento sem incorporação de calcário. Os valores das resistências, que se obtêm, são influenciados: pela qualidade do calcário, pela distribuição de tamanho das partículas de cimento e calcário e pelo momento em que ambos se misturam no moinho, na fase de produção de cimento, ou posteriormente.

No que respeita à trabalhabilidade existem resultados contraditórios, publicados na literatura, que mostram que a incorporação de *filler* conduz tanto ao aumento, como à diminuição da necessidade de água, dependendo: da composição química do calcário, da sua percentagem de incorporação, do grau de finura e da distribuição de tamanho das suas partículas [61,62,63,64]. Tipicamente, partículas mais finas e distribuições de tamanho de partículas mais largas diminuem a necessidade de água.

No que respeita ao tempo de presa é, geralmente, aceite que o tempo inicial e final de presa diminui à medida que o grau de finura aumenta, embora a magnitude deste efeito sofra oscilações entre diversos estudos [62] e se possa, também, verificar o aumento destes tempos em cimentos contendo calcário [61].

O papel de *filler* pode ser benéfico em algumas propriedades, tais como, na durabilidade [59,65], na permeabilidade, na capilaridade [63], na exsudação [63] e na tendência para a fissuração.

#### 2.4.3. SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR DOIS MATERIAIS: RESÍDUOS DE CATALISADOR EXAUSTO PETROQUÍMICO E PEDRA NATURAL CALCÁRIA

Nesta dissertação, às misturas com incorporação de dois materiais como substituintes parciais do cimento, neste caso, resíduo do catalisador exausto da indústria petroquímica e resíduo de pedra natural (natureza calcária) oriundo da indústria transformadora de pedra natural, designou-se por misturas ternárias (Secção 3.1).

A substituição parcial de cimento produz alterações nas propriedades finais dos materiais à base de cimento (Secções 2.4.1 e 2.4.2.). No entanto, por um lado, nem sempre os seus efeitos são benéficos para o fim a que esses materiais se destinam e, por outro lado, nem sempre os efeitos são no mesmo

sentido, tanto em termos de reologia, como das suas propriedades no estado endurecido. Por este motivo, a substituição de cimento por dois ou mais materiais, em simultâneo, podem resultar sinergias com benefícios tecnológicos, ambientais ou económicos.

Na bibliografia não se encontram disponíveis, até ao momento, trabalhos de avaliação dos efeitos da substituição simultânea de cimento por catalisadores exaustos de FCC e por outro material, nomeadamente calcário. No entanto, a incorporação concomitante de calcário e outros materiais tem sido avaliada pela comunidade científica com, por exemplo, cinzas volantes [66,67,68]; pozolanas naturais [65] e com escórias [59].

### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste estudo experimental pretende-se avaliar se as misturas de cimento corrente nas quais parte deste é substituído por um e/ou dois resíduos sólidos industriais – catalisador exausto de FCC e pedra natural calcária – também correspondem aos requisitos mecânicos e físicos, aos quais, de entre outros, os cimentos e seus constituintes devem respeitar para serem certificados e que estão especificados na norma NP EN 197-1 [1], bem como comparar as propriedades dos cimentos com diferentes fracções volúmicas de resíduos incorporados com as propriedades do cimento CEM I 42,5R, sem incorporação de resíduos.

Para tal, o desenvolvimento do trabalho experimental tem como objecto de estudo 21 misturas de cimentos, com e sem incorporação de resíduos (Quadro 3.1) com as quais se preparam pastas e argamassas, que são ensaiadas no estado fresco – nos instantes seguintes à sua preparação (Subcapítulo 3.4) – e no estado endurecido, concretamente aos 2, 7, 14, 28, 56 e 90 dias de idade<sup>1</sup> (Subcapítulo 3.5).

Esta dissertação tem por base dois estudos, ainda em curso, nos quais se analisam misturas de cimento com substituição parcial deste por resíduos de catalisador exausto da indústria petroquímica e pedra natural (natureza calcária). Assim, na definição das composições, teve-se presente o interesse em dar seguimento aos estudos realizados, no sentido de avaliar as sinergias que podem advir da substituição parcial do cimento pelos dois resíduos, em simultâneo.

No Quadro 3.1 apresenta-se a designação adoptada para as misturas em função da composição do ligante<sup>2</sup>. Esclarece-se que, por exemplo, para a mistura designada por “80C+5FCC+15rPC(+SP)” corresponde uma percentagem de incorporação de 80% de cimento Portland (CEM I 42,5R) e 20% de

---

<sup>1</sup> Entende-se por *idade*, o tempo contado desde o instante em que se adiciona o ligante à água, na preparação da argamassa, até ao momento em que o material é ensaiado.

<sup>2</sup> Neste trabalho, por forma a simplificar a terminologia adoptada, considera-se *ligante*, como sendo o conjunto do cimento e do(s) resíduo(s). Esta designação poderá incorrer num abuso de terminologia, uma vez que o resíduo de pedra calcária é um composto quimicamente inerte (Secção 2.4.2).

resíduos sólidos industriais (dos quais, 5% é catalisador exausto petroquímico e os restantes 15% são pedra natural calcária) com superplastificante (SikaPlast 898).

Quadro 3.1 - Designação e composição das misturas estudadas.

Família	Mistura	Ligante (%)		
		Cimento CEM I 42,5R [C]	Catalisador exausto petroquímico [FCC]	Resíduo de pedra natural calcária [rPC]
Referência	100C(CEN)	100	0	0
	100C	100	0	0
	100C(+SP)	100	0	0
Misturas binárias <sup>3</sup>	95C+5FCC(+SP)	95	5	0
	90C+10FCC(+SP)	90	10	0
	85C+15FCC(+SP)	85	15	0
	95C+5rPC(+SP)	95	0	5
	90C+10rPC(+SP)	90	0	10
	85C+15rPC(+SP)	85	0	15
	80C+20rPC(+SP)	80	0	20
	75C+25rPC(+SP)	75	0	25
	70C+30rPC(+SP)	70	0	30
	Misturas ternárias <sup>4</sup>	80C+5FCC+15rPC(+SP)	80	5
80C+10FCC+10rPC(+SP)		80	10	10
80C+15FCC+5rPC(+SP)		80	15	5
75C+5FCC+20rPC(+SP)		75	5	20
75C+10FCC+15rPC(+SP)		75	10	15
75C+15FCC+10rPC(+SP)		75	15	10
70C+5FCC+25rPC(+SP)		70	5	25
70C+10FCC+20rPC(+SP)		70	10	20
70C+15FCC+15rPC(+SP)	70	15	15	

Repare-se que, ao longo do texto, para simplificar a alusão às misturas estudadas, considerou-se que estas estão agrupadas em 3 “famílias”:

- (i) Família de referência, nas quais o único ligante é o cimento Portland (CEM I 42,5R), tendo-se as composições com areia normalizada/comercial – mistura 100C(CEN) – e com areia normalizada, cuja mistura se efectuou no laboratório, com e sem superplastificante, as misturas 100C(+SP) e 100C, respectivamente;

<sup>3</sup> No domínio do estudo de cimentos com substituição parcial deste por outros materiais é frequente designar-se *mistura binária*, como sendo um cimento com incorporação de um outro material. Neste trabalho considera-se, portanto, *misturas binárias*, as misturas dos cimentos com substituição parcial deste por um dos resíduos.

<sup>4</sup> No domínio do estudo de cimentos com substituição parcial deste por outros materiais é frequente designar-se *mistura ternária*, como sendo um cimento com incorporação de dois outros materiais. Neste trabalho considera-se, portanto, *misturas ternárias*, as misturas dos cimentos com substituição parcial deste por ambos os resíduos estudados – resíduo de catalisador exausto da indústria petroquímica e resíduo de pedra calcária da indústria de transformação da pedra natural.

- (ii) Família das misturas binárias<sup>3</sup> nas quais se substitui, parcialmente, o cimento corrente (CEM I 42,5R) por um resíduo sólido industrial. Tendo-se preparado as misturas com substituição de 5, 10 e 15% de cimento por catalisador exausto de FCC; e, as misturas com substituição de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% de cimento por resíduo de pedra natural calcária;
- (iii) Família das misturas ternárias<sup>4</sup> que envolvem a substituição do cimento corrente por ambos os resíduos em estudo, tendo-se preparado misturas com percentagens de substituição de 20, 25 e 30% de substituição, variando o teor de resíduos incorporados.

O programa de ensaios experimentais, associado a cada mistura, inclui a sequência de actividades que se encontra sistematizada no Quadro 3.2.

**Quadro 3.2 - Campanha de ensaios desenvolvida para todas as misturas estudadas.**

Descrição sumária da actividade		Subsecção	
Preparação da pasta de consistência normal		3.4.1.	
Preparação da argamassa		3.4.2.	
	Determinação da consistência por espalhamento	3.4.2.1.	
Ensaio no estado fresco	Determinação da massa volúmica	3.4.2.2.	
	Determinação do teor de ar	3.4.2.3.	
	Determinação dos tempos – início e fim – de presa	3.4.1.1.	
<b>Moldagem</b>			
Desmoldagem, pesagem e identificação		3.5.1.	
<b>Condicionamento na câmara de cura</b>			
Ensaio no estado endurecido	Determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas	idades de 2, 7, 28, 56, 90 dias	3.5.1.1.
	Determinação da resistência à compressão	ensaio	3.5.1.2.
	Determinação da resistência à flexão		3.5.1.2.
	Determinação da absorção de água por capilaridade		3.5.1.3.

Na caracterização das misturas recorre-se a diversas técnicas laboratoriais e ensaios *in-situ*, tendo-se presente o cuidado de garantir as condições atmosféricas estabelecidas pela norma NP EN 196-1 [69] durante a preparação, moldagem, cura e desmoldagem dos provetes, em termos de temperatura e humidade.

O trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção (Departamento de Engenharia Civil) do ISEL. No sentido de acautelar possíveis acidentes no laboratório, no manuseamento de todos os equipamentos, materiais e soluções, teve-se em consideração a utilização de protecções adequadas, desde bata, luvas, entre outros, com vista a evitar o contacto dos produtos com a pele.

Neste Capítulo apresenta-se mais pormenorizadamente: o plano de ensaios (Subcapítulo 3.2); os materiais (Subcapítulo 3.3) presentes nas misturas (Quadro 3.1); as metodologias adoptadas na

realização dos ensaios no estado fresco (Subcapítulo 3.4) e endurecido (Subcapítulo 3.5), estabelecendo-se o enquadramento com as referências normativas em vigor, e apresentando-se as expressões de cálculo associados.

### 3.2. DESCRIÇÃO DO PLANO DE ENSAIOS

Como referido, anteriormente, pretende-se avaliar os cimentos com incorporação de resíduos à luz da norma NP EN 197-1 [1]. Segundo esta norma, de modo a avaliar se as pastas de cimento com substituição parcial deste por resíduo(s) sólido(s) industrial(ais), também, correspondem aos requisitos físicos (nomeadamente tempo de início de presa) preparam-se pastas de consistência normal (Secção 3.4.1.), conforme o preconizado pela norma NP 196-3 [70].

Segundo a norma NP EN 197-1 [1] a determinação da resistência mecânica de referência dos cimentos, à compressão, é determinada de acordo com a norma NP EN 196-1 [69] que prevê, também, o procedimento de preparação de argamassas.

Com o intuito de otimizar a velocidade de realização dos ensaios experimentais estudou-se, numa fase preliminar, a possibilidade de produzir uma maior quantidade de argamassa que a prevista por aquela norma, com o mesmo equipamento, sem que os resultados no estado fresco e no estado endurecido fossem afectados. Para o efeito, verificou-se a reprodutibilidade dos resultados quando se prepara a quantidade de argamassa, prevista na norma NP EN 196-1 [69], e uma porção superior, nomeadamente, com o quádruplo da porção, sendo esta compatível com a capacidade máxima que a cuba da máquina (misturadora mecânica) comporta (Anexo C.1).

Para a viabilização do plano de ensaios, no prazo estabelecido, procedeu-se ao planeamento da preparação de argamassas que requeria a realização de 42 amassaduras. O plano de ensaios foi concebido de modo a reduzir a variabilidade inerente a estes estudos, tendo as amassaduras sido executadas em 11 dias de produção, numa média de 4 amassaduras por dia (Anexo A).

Estando a relação água/ligante definida, à priori, pela norma NP EN 196-1 [69] com o valor de 0,5 pretendeu-se determinar a quantidade de superplastificante necessária às misturas com resíduos, conducentes a uma consistência semelhante à da mistura sem incorporação de resíduos. Neste sentido, inicialmente produziu-se uma argamassa de referência – 100C – de acordo com a norma NP EN 196-1 [69], com a qual se realizaram os ensaios de estado fresco (Subcapítulo 3.4). Em seguida, prepararam-se diversas amostras teste (na mesma quantidade) da mistura constituída pela substituição de 15% de cimento por resíduo de FCC (85C+15FCC) com diferentes incorporações de

superplastificante, até se obter a trabalhabilidade da argamassa de referência. Escolheu-se, para a determinação da quantidade de superplastificante a adicionar, a mistura 85C+15FCC porque, à partida, seria a conducente à maior perda de consistência, uma vez que, é a mistura que contém maior teor de incorporação de resíduo de FCC e, dispondo este de uma área superficial específica muito elevada, é o que deverá contribuir para a perda de fluidez das argamassas no estado fresco (Subsecção 3.4.2.1). Refira-se que, uma vez determinada a quantidade de superplastificante procedeu-se à amassadura de 4 vezes a quantidade prevista na norma NP EN 196-1 [69], verificando-se se, de facto, a quantidade de superplastificante determinada conduz ao mesmo diâmetro de espalhamento da argamassa de referência preparada na mesma quantidade (isto é, quatro vezes a quantidade prevista na norma).

A segunda fase experimental, segue-se à fase de obtenção da quantidade de superplastificante necessária, consiste na realização das amassaduras (4 doses<sup>5</sup>) para as outras composições, previstas no Quadro 3.1, com a adição de superplastificante determinada. Para cada mistura realizam-se duas amassaduras de 4 doses, através das quais se obtém argamassa para a realização dos ensaios de fresco (Subcapítulo 3.4), e se obtêm 21 provetes prismáticos a ser usados na caracterização das argamassas no estado endurecido (Subcapítulo 3.5):

- Com a primeira amassadura, executa-se a caracterização da argamassa no estado fresco e no estado endurecido (2, 7 e 28 dias). Os ensaios no estado fresco, realizados logo após a produção da argamassa, consistem na determinação: da consistência por espalhamento (Subsecção 3.4.2.1), da massa volúmica (Subsecção 3.4.2.2) e do teor de ar (Subsecção 3.4.2.3). Após a realização dos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco, procede-se ao enchimento de 3 moldes, cujo procedimento de moldagem, cura e desmoldagem são explanados na Secção 3.5.1. Cada molde, viabiliza a execução de três provetes prismáticos de dimensões 40x40x160mm<sup>3</sup>. O desempenho da argamassa no estado endurecido é avaliado sobre 3 prismas, afectos a cada idade, através dos ensaios de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (Subsecção 3.5.1.1), seguido do ensaio de resistência à flexão (Subsecção 3.5.1.2), do qual resultam 6 semi-prismas, com 40x40x80mm<sup>3</sup>, sensivelmente, destinados ao ensaio de compressão (Subsecção 3.5.1.2);
- A segunda amassadura permite o enchimento de 4 moldes, dos quais se adquirem 12 provetes. De modo a avaliar a repetibilidade e reprodutibilidade entre as duas amassaduras, repetem-se os ensaios de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e de resistência mecânica (flexão e compressão) aos 28 dias, sobre 4 provetes e, após a exclusão do provete

<sup>5</sup> Neste trabalho considerou-se como “dose” a quantidade de argamassa, prevista na norma NP EN 196-1 [69], que corresponde à quantidade necessária para a produção (e moldagem) de 3 provetes, com dimensões 40x40x160mm<sup>3</sup>.

que apresenta maior desvio em relação à média, calcula-se o coeficiente de variação sobre os valores de força de compressão obtidos nas duas amassaduras para os 28 dias de hidratação. Apenas são aceites as amassaduras, cujo coeficiente de variação é inferior a 3%, sendo necessária a realização de novas amassaduras, para os outros casos, até se verificar o pretendido (Subsecção 3.5.1.2.). Os provetes da segunda amassadura permitem, ainda, a determinação da resistência mecânica para idades mais avançadas (56 e 90 dias). Os restantes dois provetes, não submetidos aos ensaios mencionados, utilizam-se na determinação da absorção de água por capilaridade (Subsecção 3.5.1.3).

Na produção das argamassas e pastas utiliza-se uma misturadora mecânica, de modo a garantir condições normalizadas para todas as misturas. A misturadora, requerida pela norma NP EN 196-1 [69], consiste essencialmente numa cuba, recipiente em aço inoxidável, e uma pá misturadora accionada por motor eléctrico. A pá da misturadora roda sobre si mesma, acompanhada de um movimento planetário, em torno do eixo da cuba. Evidencia-se que, os tempos afectos às diferentes operações são controlados pelo operador, com o auxílio de um cronómetro.

O plano de ensaios está definido no Anexo A, no qual se apresenta a calendarização das actividades (Anexo A.1), bem como, a descrição diária da campanha experimental (Anexo A.2).

### **3.3. MATERIAIS**

Nesta campanha experimental utilizam-se os seguintes materiais sólidos: o cimento Portland (CEM I 42,5R), os resíduos sólidos industriais (catalisador exausto e pedra natural calcária) e agregado fino que se apresentam, com mais detalhe, abaixo neste Subcapítulo. Todos estes materiais foram adequadamente armazenados, dentro de sacos de plástico resistente e colocados em recipientes plásticos (vasilhas) fechados com tampa vedante pretendendo-se, assim, manter as condições de humidade dos materiais, desde o momento em que são conservados, até ao instante em que são retiradas as devidas porções para produção das argamassas, com o intuito de evitar o seu envelhecimento e degradação. Aproveitou-se a quantidade suficiente destes materiais e, para cada ensaio, foram retiradas as porções necessárias, havendo a preocupação de homogeneizar previamente os materiais que se encontravam em cada vasilha.

A água destilada e o superplastificante (SikaPlast 898) completam a composição da argamassa em estudo.

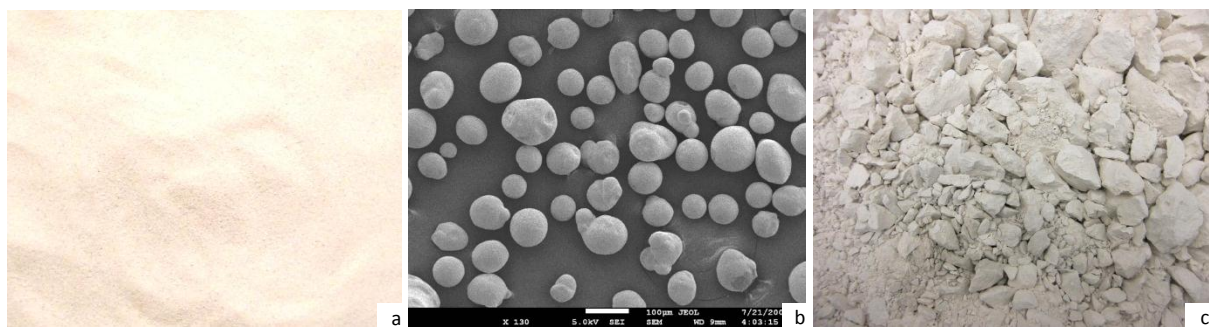
### 3.3.1. LIGANTE

Segundo a normalização designa-se o cimento corrente utilizado por: cimento Portland da classe de resistência 42,5 que apresenta resistência elevada aos primeiros dias. A amostra de CEM I 42,5R foi fornecida pelo Grupo CIMPOR – fábrica de Alhandra (Silo 21), no dia 12 de Maio de 2010. A ficha técnica deste produto pode ser consultada no Anexo B.1.

A utilização de CEM I prendeu-se com a necessidade de evitar a variação simultânea de diferentes factores, com possível influência sobre os resultados dos ensaios efectuados, situação que seria mais difícil de controlar num cimento composto. Segundo a norma NP EN 197-1 [1] e a ficha técnica do produto a percentagem de clínquer, deste cimento corrente, varia entre 95 a 100% (Quadro 2.1).

A classe de resistência do cimento foi a 42,5R, uma vez que é esta a classe comumente utilizada em obras correntes de engenharia civil, para além das vantagens económicas e de disponibilidade de mercado apresentadas por este produto.

O catalisador exausto da indústria petroquímica (Figura 3.1.a) apresenta significativos teores de alumina e sílica na sua composição (descrito na Secção 2.4.1). A amostra deste resíduo foi fornecida pela refinaria de Sines da Petrogal em Junho de 2010.



**Figura 3.1 - Resíduos sólidos industriais. a) Catalisador exausto oriundo da indústria petrolífera; b) Imagem de microscopia electrónica de varrimento, obtida em modo de electrões secundário (JEOL JSM 7001F), das partículas dos catalisadores exaustos da unidade de FCC da refinaria da Petrogal em Sines [70]; c) Resíduo de pedra natural proveniente da transformação de pedra natural.**

O resíduo de pedra natural de natureza calcária (Figura 3.1.c) foi obtido em Junho de 2010, à Associação Gestora de Inertes (GESTIN), sito em Porto Mós. A amostra foi desagregada com auxílio de um pilão.

### 3.3.2. AGREGADO

O agregado utilizado no estudo das composições (excepto para a mistura 100C(CEN) do Quadro 3.1), corresponde aos requisitos requeridos na norma NP EN 196-1 [69] - areia natural siliciosa de grãos arredondados, com teor de sílica superior a 98% (Anexo D.1), cuja separação das fracções e mistura

dos agregados foi realizada no laboratório. De uma forma resumida, o processo de separação granulométrica (Figura 3.2) consistiu na peneiração, a seco, através de um conjunto de peneiros de aberturas de malha quadrada normalizadas (Quadro 3.3), dispostos de cima para baixo, por ordem decrescente de dimensão de aberturas, definidos pela norma NP EN 196-1 [69].



Figura 3.2 - Separação granulométrica (peneiração mecânica). a) Série de peneiros de malha quadrada; b) Resíduo de areia (AS 30/40) acumulado (na malha 0,5 mm).

Quadro 3.3 - Composição granulométrica da areia normalizada/comercial CEN, preconizada pela norma NP EN 196-1 [69].

Malha do peneiro (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Resíduos acumulados (%)	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

Uma vez que o âmbito desta dissertação prende-se com o estudo da influência do ligante no comportamento das argamassas, utilizou-se a mesma mistura de areias (Anexo B), na proporção apresentada no quadro seguinte (Quadro 3.4).

Quadro 3.4 - Composição granulométrica da areia normalizada misturada em laboratório.

Agregado	SM 60/30		A30/40			S90/100	Total (g)
Malha do peneiro(mm)	1,60	1,00	1,00	0,50	0,16	0,08	
Quantidade: 1 dose	95,5	177,3	177,3	463,6	272,7	163,6	1350,0
Quantidade: 4 doses	381,8	709,0	709,0	1854,6	1090,9	654,6	5399,9

A argamassa da mistura 100C(CEN) (Quadro 3.1) utiliza areia normalizada/comercial, intencionalmente, para a realização dos ensaios de acordo com a norma NP EN 196-1 [69], a que a indústria cimenteira europeia recorre frequentemente nos laboratórios de qualidade dos cimentos, produzida pela empresa *Société Nouvelle du Littoral* (SNL). A ficha desta areia apresenta-se no Anexo B.3.

### 3.3.3. ÁGUA

Nas formulações (pastas e argamassas) utiliza-se água destilada, conforme requerido pela norma NP EN 196-1 [69] obtida pelo equipamento do Laboratório de Química do Departamento de Engenharia Civil deste Instituto.

### 3.3.4. SUPERPLASTIFICANTE

A necessidade de incorporação de um superplastificante nas composições, não foi motivada exclusivamente com o intuito de induzir trabalhabilidade (Subcapítulo 3.2), mas, também, pela necessidade de simular composições melhoradas.

O superplastificante comercial (SikaPlast 898), de elevado desempenho, foi fornecido pela empresa SIKA. Este produto permite a obtenção de uma forte plastificação e uma longa manutenção da consistência, aliada a um desenvolvimento rápido de resistência mecânica, conforme a descrição técnica do produto apresentado no Anexo B.4. A quantidade de incorporação do superplastificante foi ajustada em função da trabalhabilidade pretendida que, por sua vez, é controlada pelo ensaio consistência por espalhamento, explanado anteriormente (Subcapítulo 3.2).

## 3.4. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

### 3.4.1. PRODUÇÃO DA PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL

O comportamento de uma pasta depende de diversos factores, nomeadamente, das características dos ligantes (distribuição granulométrica de partículas, distribuição das fases aluminato e silicato, etc), temperatura, pressão, concentração de aditivos, velocidade e ordem de mistura e razão água/ligante.

Como as propriedades que se medem, neste ensaio, são em função da quantidade de água com que se amassa a pasta, é necessário determinar o volume da água a adicionar. Para isso, a norma NP EN 196-3 [71] define uma certa característica para a pasta: a consistência normal.

#### ❖ ***Normalização e observações ao procedimento***

Este ensaio baseia-se na norma NP EN 196-3 [71], tendo sido utilizado, durante o processo de mistura, um procedimento alternativo, devido à necessidade de incorporação do superplastificante (SikaPlast 898, SIKA), não previsto pela norma. Considerou-se a quantidade de superplastificante a incorporar nas pastas igual à determinada pelo ensaio de consistência por espalhamento.

## ❖ Metodologia

Quadro 3.5 - Materiais utilizados na obtenção da pasta de consistência normal.

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Aparelho de Vicat (sonda Ø10mm);	- Colher de sopa;	- Água destilada 20±2°C;
- Balança com precisão 0,1g;	- Cronómetro;	- Cimento CEM I 42,5R (CIMPOR);
- Misturadora mecânica (PERTA).	- Molde e placa de vidro;	- Óleo de base mineral (GALP);
	- Pincel;	- Resíduo de catalisador exausto petroquímico (Petrogal);
	- Raspador de borracha;	- Resíduo de pedra natural calcária (GESTIN);
	- Régua metálica.	- Superplastificante SikaPlast 898 (SIKA).

A primeira fase do ensaio consiste na preparação dos utensílios (que inclui a lubrificação do molde e da placa de vidro com óleo mineral) e da pasta. Para tal, pesa-se uma determinada quantidade de água na cuba da misturadora mecânica, à qual se adiciona o superplastificante. A misturadora deve ser accionada durante 2 minutos, funcionando em velocidade lenta. O ligante (de acordo com a mistura em estudo, Quadro 3.1) é adicionado à água nos seguintes 10 segundos, iniciando-se assim a contagem do tempo (tempo zero) e procedendo-se à mistura da formulação durante 90 segundos. A máquina é parada, retira-se a cuba da misturadora e raspa-se a pasta aderente às paredes e ao fundo do recipiente, colocando-a no centro da mesma. A misturadora mecânica é novamente accionada durante 90 segundos.

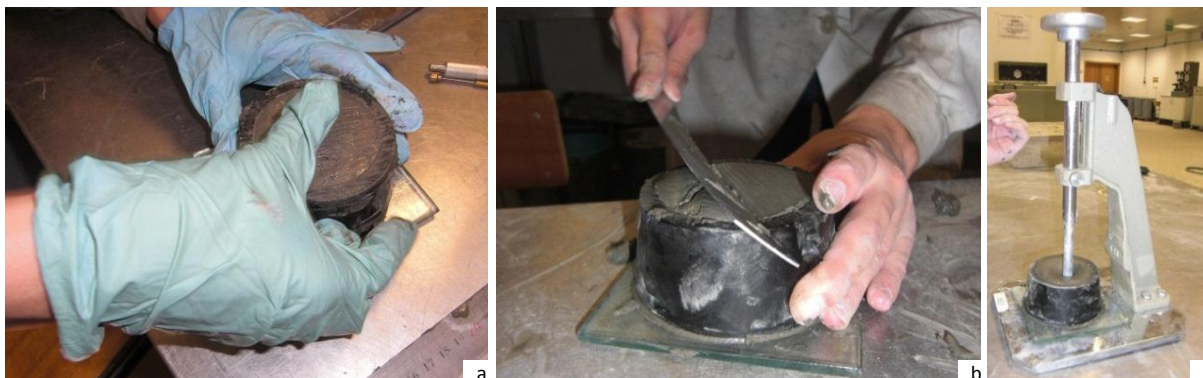


Figura 3.3 - Fases de preparação da pasta de consistência normal. a) Calcamento da pasta no molde; b) Regularização da superfície da pasta; c) Aparelho de Vicat (sonda Ø10mm).

Após a preparação da pasta, esta é colocada no molde do aparelho de Vicat e pressionada suavemente através de calcamentos com a palma da mão, eliminando assim, os vazios da pasta (Figura 3.3.a). O excesso de pasta é removido, com auxílio da régua metálica, através de um movimento de serra (Figura 3.3.b). A pasta é penetrada por uma sonda, constituída por um cilindro com 10mm de diâmetro e 50mm de comprimento, ligada à parte móvel do aparelho de Vicat, após o ajuste manual no zero da escala. A precisão do ensaio é afectada pela velocidade com que a sonda penetra na pasta e, por isso, é necessário reduzi-la ao mínimo, actuando no dispositivo de descida da

sonda, deixando-a afundar sob a acção do seu próprio peso (Figura 3.3.c). A leitura da escala efectua-se após 30 segundos. De acordo com a norma, a pasta atinge a consistência normal quando, tendo sido amassada sobre as condições normalizadas descritas anteriormente, contém uma quantidade de água tal, que a sonda de consistência fica a  $6\pm 1$ mm do fundo do molde que contém a pasta. O ensaio é pois repetido, sucessivamente, para teores de água diferentes, até se obter o valor indicado, devendo a sonda ser limpa após cada penetração.

#### 3.4.1.1. TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PRESA

Entende-se por presa o momento da passagem do estado plástico (pastoso) ao sólido, ou seja, corresponde ao endurecimento da pasta. Como a variação é gradual, não se distingue com exactidão o instante em que ocorre esta mudança de estado.

O ensaio consiste na observação da penetração de uma agulha numa pasta de consistência normal, até ao momento em que se atinge um determinado valor. Distinguem-se dois períodos para o tempo de presa: início e fim. O primeiro corresponde ao tempo decorrido entre a amassadura e o início de perda de plasticidade. O segundo é o tempo necessário para que a pasta adquira firmeza suficiente para resistir a uma certa pressão e que, de certa forma, marca o fim da fase plástica e o início da fase sólida.

A agulha do aparelho de Vicat, utilizada na determinação do início de presa, é de aço, em forma de cilindro, com diâmetro de 1,13mm e comprimento 50mm. Atinge-se o início de presa, quando a agulha de Vicat já não atravessa a totalidade da pasta colocada no molde, ficando a  $4\pm 1$ mm da base. Para a determinação do fim de presa, o aparelho de Vicat, é munido de uma agulha com um acessório anelar na extremidade de 5mm de diâmetro, de modo que a extremidade da agulha se projecte verticalmente 0,5mm além da aresta do acessório.

#### ❖ *Normalização e observações ao procedimento*

A determinação do tempo de presa consiste na aplicação do procedimento descrito na norma NP EN 196-3 [71] e sucede o ensaio de verificação da consistência normal da pasta (Secção 3.4.1.).

#### ❖ *Metodologia*

**Quadro 3.6 - Materiais utilizados na determinação dos tempos - início e fim - de presa da pasta de consistência normal – estado fresco.**

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Aparelho de Vicat (agulha $\emptyset 0,13$ mm; agulha com acessório anelar $\emptyset 0,5$ mm).	- Cronómetro; - Recipiente.	Água destilada $20\pm 2^\circ\text{C}$ .



Figura 3.4 - Fases de determinação dos tempos – início e fim – de presa (estado fresco). a) Molde e placa imersos no recipiente; b) Ajuste da agulha de determinação do início de presa no aparelho de Vicat; c) Determinação do tempo de fim de presa; d) Detecção visual do fim de presa.

Após obtenção da pasta de consistência normal (Secção 3.4.1.), o molde e a placa de vidro são colocados num recipiente mergulhados em água (20°C), durante 30 minutos (Figura 3.4.a). Após este período, retira-se o molde e a placa e, ajustando-se, manualmente, a agulha de Vicat ( $\varnothing 1,13\text{mm}$ ) no zero da escala, baixa-se com cuidado, com uma pausa inicial no movimento, de modo a evitar uma velocidade ou aceleração forçadas das partes móveis, efectuando-se a leitura após 30 segundos (Figura 3.4.b).

No caso de leitura diferente do desejado, repete-se o ensaio de penetração no mesmo provete em posições espaçadas no mínimo do bordo de 8mm e espaçadas entre si de 5mm (10mm no caso da

última penetração) em intervalos de 10 minutos, permanecendo entre as leituras, o molde e a placa conservados na câmara de cura.

O fim de presa é determinado no provete anteriormente ensaiado, mas sobre a face do provete que inicialmente estava em contacto com a base. O molde e a placa de vidro são, novamente, mergulhados no recipiente colocado na câmara de cura, durante 30 minutos. Com a agulha de Vicat preparada com o acessório anelar, para determinação do tempo de fim de presa, colocada no aparelho de Vicat, baixa-se a agulha no centro do molde até que esta entre em contacto com a pasta e solta-se (Figura 3.4.c).

O ensaio é repetido diversas vezes, em vários pontos da mesma amostra, durante intervalos de 10 minutos, até se verificar o fim de presa, que coincide com o momento em que a agulha penetra, pela primeira vez, no provete apenas 0,5mm, sem que o acessório circular imprima qualquer traço na superfície (Figura 3.4.d). Entre leituras, o molde e a placa devem ser colocados na câmara de cura.

### 3.4.2. PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

#### ❖ **Normalização e observações ao procedimento**

A preparação de argamassas tem como base a norma NP EN 196-1 (Subcapítulo 3.2). Nesta norma [69], cada amassadura prevê a preparação de argamassa com a composição, em massa, de uma parte de cimento, três partes de areia e meia parte de água (razão água/cimento=0,5), em quantidades suficientes para moldar três provetes, o que corresponde às seguintes quantidades: 225g de água, 450g de ligante e 1350g de areia.

Durante o processo de mistura, utilizou-se um procedimento alternativo, devido à necessidade de incorporação de superplastificante à mistura, não previsto pela norma. A quantidade de SikaPlast 898 a adicionar foi determinada recorrendo ao ensaio de avaliação da consistência por espalhamento, tal como descrito no Subcapítulo 3.2.

#### ❖ **Metodologia**

Quadro 3.7 - Materiais utilizados na produção de argamassas.

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Balança (precisão 0,1g);	- 2 Copos graduados;	- Agregado fino;
- Misturadora mecânica (PERTA).	- Bureta;	- Água destilada (20°C);
	- Cronómetro;	- Cimento CEM I 42,5R (CIMPOR);
	- Raspador de borracha.	- Resíduo de catalisador exausto petroquímico (Petrogal);
		- Resíduo de pedra natural calcária (GESTIN);
		- Superplastificante SikaPlast 898 (SIKA).

Como etapa preliminar à produção de argamassas, tem-se a pesagem de todos os constituintes, para que, aquando do processo de mistura, todos os componentes se encontrem disponíveis, nas devidas proporções, no sentido de tudo estar preparado para a realização da amassadura. Assim, todos os materiais que constituem as argamassas em estudo (ligante, agregado, água e superplastificante) são pesados numa balança com precisão 0,1g, de acordo com as necessidades de mistura.



**Figura 3.5 - Fases de preparação de argamassa. a) Misturadora mecânica; b) Misturadora em funcionamento ( $v_1$ ); c) Recolha da argamassa aderente às paredes e fundo da cuba.**

O procedimento inicia-se com a colocação de metade da quantidade total necessária de agregado na cuba da misturadora (Figura 3.5.a), à qual se junta a mistura, de forma ordenada (cimento CEM I 42,5R; resíduo do catalisador FCC; resíduo de pedra natural calcária). Acciona-se o botão de arranque do sistema, misturando a preparação durante 1 minuto à velocidade lenta ( $140 \pm 5$  r.p.m). Após a adição da restante quantidade de agregado à cuba, torna-se a misturar a seco a preparação mais um minuto.

Durante o minuto seguinte, junta-se  $2/3$  da água destilada prevista. O tempo zero inicia-se aquando a mistura da água com o ligante. Introduce-se, em seguida, o superplastificante com a restante água destilada, envolvendo o conjunto à velocidade lenta ( $v_1$ ), durante 5 minutos (Figura 3.5.b). Este processo conduz ao aproveitamento máximo do superplastificante e permite controlar convenientemente a razão água/ligante. Segue-se um período de repouso (2 minutos), conseguido através da paragem do sistema de mistura, no qual durante o primeiro minuto, se retira a cuba do mecanismo, e com a ajuda de um raspador de borracha, recolhe-se a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente, colocando-a no centro do recipiente, de modo a obter-se uma mistura mais homogénea e uma boa ligação entre os constituintes. Ao fim do tempo referido, coloca-se novamente a cuba na misturadora, colocando-a em funcionamento durante 1 minuto, ao fim do qual o processo de amassadura termina (Figura 3.5.c).

O procedimento apresentado consiste no fabrico de argamassas generalizado. Ressalva-se que, no caso da mistura de referência (100C), na qual não houve a adição de superplastificante, a introdução de água destilada realiza-se de uma só vez, durante 6 minutos. Em relação aos tempos de mistura e repouso das preparações, tanto para 1 como para 4 doses, mantém-se inalteráveis.

#### 3.4.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

A consistência é uma medida de fluidez da argamassa fresca, quando submetida a um certo tipo de esforço. De acordo com a norma, o valor da consistência por espalhamento é, também, uma quantificação do grau de molhagem das argamassas frescas e fornece uma indicação sobre a deformabilidade dessas argamassas quando submetidas a determinado tipo de tensão [72].

Este ensaio tem, assim, como objectivo, a determinação da fluidez e/ou grau de molhagem das argamassas frescas, permitindo analisar a influência da quantidade de água, o efeito da incorporação de resíduo(s), o efeito da dosagem de superplastificante e determinar a compatibilidade do ligante com o superplastificante.

#### ❖ *Normalização e observações ao procedimento*

O ensaio foi realizado tendo em conta as indicações da norma EN 1015-3 [73].

#### ❖ *Metodologia*

**Quadro 3.8 - Materiais utilizados na determinação da consistência por espalhamento - ensaio estado fresco.**

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Mesa de espalhamento e molde tronco-cónico.	- Colher de sopa (metal); - Cronómetro; - Pano húmido; - Pano seco; - Papel absorvente; - Pilão de madeira; - Pincel; - Régua metálica.	- Óleo de base mineral (GALP).

Antes de se iniciar o ensaio, a superfície interna e os bordos do molde tronco-cónico devem ser limpos com um pano humedecido, tendo presente o cuidado de assegurar o mesmo grau de humedecimento dos equipamentos. Ainda numa fase preliminar, a superfície da mesa de espalhamento deve ser lubrificada com óleo mineral, removendo-se o excesso com papel absorvente.

De modo a neutralizar qualquer falso ajustamento, sem que, contudo, haja qualquer mistura adicional da amostra, deve-se mexer suavemente, com uma colher cerca de 5 a 10 segundos, a argamassa fresca.



Figura 3.6 - Fases do ensaio de consistência por espalhamento (estado fresco). a) Compactação com pilão de madeira da 1ªcamada; b) Emprego da 2ª camada de argamassa; c) Compactação com pilão de madeira da 2ªcamada; d) Regularização da superfície; e) Levantamento do molde tronco-cónico; f) Espalhamento da argamassa na mesa de espalhamento, após 15 pancadas; g) Medição do espalhamento da argamassa (direcção 1); h) Medição do espalhamento da argamassa (direcção 2).

Coloca-se o molde no centro da mesa de espalhamento e, segurando o molde firmemente nesta posição, introduz-se a argamassa, com auxílio de uma colher, até metade da sua capacidade. Procede-se à compactação com o pilão de madeira, através de 10 calcamentos da primeira camada no sentido horário (Figura 3.6.a). Durante esta operação deve-se atingir bem, toda a espessura da camada, por forma a garantir um enchimento uniforme do molde. De seguida, completa-se o

enchimento do molde, com um ligeiro excesso (Figura 3.6.b), tornando-se a compactar 10 vezes esta segunda camada (Figura 3.6.c). Após a compactação, rasa-se ao nível do molde, o excesso da argamassa através de um movimento de serra executado pela régua metálica (Figura 3.6.d). A superfície livre da mesa de espalhamento deve ser posteriormente limpa e seca de quaisquer fragmentos de argamassa que possam ter caído no decorrer do alisamento da superfície. Decorridos 15 segundos, levanta-se o molde na vertical, lentamente e submete-se a amostra a 15 pancadas, através da rotação do volante da mesa de espalhamento, em cerca de 15 segundos, a frequência constante (Figuras 3.6.e e 3.6.f).

Com recurso à régua metálica, mede-se o diâmetro do espalhamento da argamassa em duas direcções perpendiculares, entre pontos opostos da linha de contorno da argamassa, segundo dois eixos marcados na mesa (Figuras 3.6.g e 3.6.h).

#### ❖ *Expressão de cálculo*

O valor de consistência calculado corresponde à média aritmética de duas leituras ortogonais registado pela amostra de argamassa, e é apresentado com a precisão de décima de centímetro (Eq. 3.1).

$$d_m = \frac{d_i}{2} \text{ (mm)} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

sendo,

$d_m$ - diâmetro de espalhamento médio (mm);

$d_i$ - diâmetro de espalhamento (mm), para  $i=1$  e  $2$ .

Se os valores individuais dos dois ensaios desviarem menos de 10% da média, utiliza-se este diâmetro como valor de consistência da argamassa. Se o desvio for superior a 10%, repete-se o ensaio utilizando a mesma amostra e, se os novos resultados divergirem da média menos de 10%, usa-se como valor da consistência a média do ensaio repetido. Caso contrário, considera-se as medições insatisfatórias e repete-se o ensaio com uma nova amostra.

#### 3.4.2.2. MASSA VOLÚMICA

Com este ensaio, pretende-se avaliar a massa volúmica aparente de uma argamassa fresca. A massa volúmica dos materiais à base de cimento depende: da massa volúmica dos agregados, da compactidade da mistura, da proporção da pasta de ligante e do tipo de superplastificante utilizado na sua mistura [74].

### ❖ *Normalização e observações ao procedimento*

A metodologia adoptada tem por base o prescrito na norma EN 1015-6 [75].

Este ensaio antecede o ensaio de determinação do teor de ar contido na argamassa, pelo que o procedimento de enchimento do recipiente (base do aerómetro) segue o especificado para o ensaio de determinação do teor de ar (norma EN 1015-7).

### ❖ *Metodologia*

**Quadro 3.9 - Materiais utilizados na determinação da massa volúmica - estado fresco.**

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Balança (precisão 0,1g).	- Colher; - Pano húmido; - Pano seco; - Recipiente.	N/A

Conforme a metodologia presente na Secção 3.3.2.3., numa fase preliminar, a argamassa é agitada com uma colher durante 5 a 10 segundos, de modo a extinguir falso ajustamento, mas sem que seja introduzida à amostra qualquer mistura adicional. O recipiente de capacidade (volume) conhecida é limpo com um pano seco e pesado na balança. Proceda-se ao enchimento do recipiente e pesagem do conjunto (recipiente e argamassa) registando-se a sua massa.

### ❖ *Expressão de cálculo*

A massa volúmica da argamassa fresca é calculada através do quociente entre a massa de uma amostra e o volume por si ocupado, conhecido à partida (Eq. 3.2).

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{(Eq. 3.2)}$$

sendo,

$\rho$  – massa volúmica da argamassa fresca (kg/m<sup>3</sup>);

$m_1$  – massa do recipiente (kg);

$m_2$  – massa do conjunto (recipiente com argamassa) (kg);

$V$  – volume do recipiente (m<sup>3</sup>).

### 3.4.2.3. TEOR DE AR

Por teor de argamassas entende-se o volume de ar contido na mistura de base de cimento fresca. O volume de ar introduzido pode resultar de diferentes factores, tais como: a velocidade e o tempo da mistura, a quantidade e tipo de superplastificante utilizado e a relação água/ligante adoptada.

#### ❖ *Normalização e observações ao procedimento*

Este ensaio consiste na aplicação do método “A: Método de Pressão”, descrito na norma EN 1015-7: 1998 [76], aplicável em argamassas, cujo conteúdo de ar é inferior a 20%. O método determina o teor de ar de uma argamassa baseando-se na variação de volume da pasta, causada pelo aumento de pressão.

#### ❖ *Metodologia*

**Quadro 3.10 - Materiais utilizados na determinação do teor de ar - estado fresco.**

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Aerómetro.	- Colher de metal; - Pano húmido; - Régua metálica.	Água destilada 20±2°C.

Numa primeira fase, deve ser verificado o estado do equipamento (aerómetro), garantindo que a bomba de pressão está presa e que as válvulas e tubagens estão em pleno funcionamento. A base do aerómetro deverá ser limpa com um pano seco.

O enchimento da base do aerómetro é feito pela introdução directa da argamassa, no recipiente, com o auxílio de uma colher (Figura 3.7.a). A primeira de quatro camadas de argamassa deve ser compactada, pelo levantamento alternado de cada lado do recipiente (10 vezes), numa frequência e altura constante (Figura 3.7.b). O procedimento de compactação repete-se para as seguintes 3 camadas.

Depois do enchimento, a superfície do recipiente é rasada, removendo-se o excesso de argamassa, através dum movimento de serra executado com uma régua metálica. O exterior e os bordos do recipiente devem ser, igualmente, limpos de eventuais porções de argamassa que resultaram da regularização da superfície (Figura 3.7.c).

Em seguida, posiciona-se a campânula do aerómetro sobre o recipiente e fecham-se as cavilhas. De modo a assegurar a despressurização da campânula, as válvulas laterais devem ser abertas, accionando a válvula correspondente. A água é injectada por forma a selar hidricamente o sistema, até sair pela outra válvula em fluxo contínuo. Neste momento as duas válvulas são fechadas,

simultaneamente (Figura 3.7.d). Aumenta-se a pressão dentro do recipiente pelo bombeamento da válvula introdutora, até que o ponteiro ultrapasse a marca vermelha em cerca de 10mm (Figura 3.7.e), regularizando-se, depois, o ponteiro até à marca de teor de ar 0%.

Por fim, acciona-se a válvula de descompressão até à estabilização do ponteiro e regista-se a leitura do teor de ar (%).



Figura 3.7 - Fases do ensaio de determinação do teor de ar (estado fresco). a) Colocação da 1ª camada de argamassa no recipiente; b) Compactação da 1ª camada de argamassa; c) Limpeza do exterior e bordos do recipiente; d) Injecção de água no aerómetro; e) Bombeamento; f) Leitura do teor de ar.

### 3.5. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

#### 3.5.1. MOLDAGEM, CONDICIONAMENTO E DESMOLDAGEM DE PROVETES

##### ❖ *Normalização e observações ao procedimento*

A moldagem, condicionamento e desmoldagem dos provetes respeita a norma NP EN 196-1 [69].

## ❖ Metodologia

Quadro 3.11 - Materiais utilizados na moldagem, condicionamento e desmoldagem de provetes prismáticos.

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Compactador automático (MATEST).	- 2 Panos; - Colher de sopa (metal); - Espátulas (maior e menor) do compactador; - Martelo de borracha; - Pincel; - Placa plana de vidro; - Régua metálica; - Toalha de turco húmida.	- Óleo de base mineral (GALP).



Figura 3.8 - Moldagem e condicionamento de provetes prismáticos ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ). a) Posicionamento do molde na mesa de compactação; b) Introdução da 1ª camada de argamassa no molde; c) Distribuição uniforme da 1ª camada de argamassa; d) Mesa de compactação mecânica; e) Regularização da superfície; f) Moldes na câmara de cura.

A preparação dos moldes consiste na aplicação de uma camada fina de óleo mineral nas faces internas dos moldes de aço, facilitando o processo de desmoldagem dos provetes. O molde é posicionado com a longa montada (Figura 3.8.a), na mesa de compactação mecânica (Figura 3.8.d), sendo o seu enchimento efectuado pela introdução directa da argamassa da cuba no molde, com o auxílio de uma colher (Figura 3.8.b). A primeira de duas camadas de argamassa é estendida

uniformemente por cada compartimento do molde, através do movimento vaivém da espátula maior que deve ser mantida verticalmente e com os bordos em contacto com a alonga (Figura 3.8.c). O compactador automático é accionado durante 1 minuto e, através de 60 pancadas, a primeira camada é compactada. Completa-se o enchimento do molde, com um ligeiro excesso, distribuindo a argamassa da segunda camada nas mesmas condições que as enunciadas anteriormente, recorrendo, desta vez, a uma espátula de menor comprimento. Torna-se a accionar o compactador automático submetendo a argamassa a mais 60 pancadas, promovendo a compactação desta segunda camada. Entre a aplicação das duas camadas coloca-se um pano húmido sobre a cuba da misturadora, com o objectivo de evitar a evaporação da água da mistura.

Após a compactação retira-se o molde do compactador automático, colocando-o na mesa de apoio, sobre a qual se remove o excesso de argamassa e se regulariza a superfície, com a ajuda de uma régua metálica, através do movimento de serra, realizado uma vez em cada direcção (Figura 3.8.e). O resíduo de argamassa que fica no perímetro do molde é retirado com auxílio de um pano húmido.

Imediatamente após o processo de moldagem, os moldes com argamassa fresca são levados para a câmara de cura, de condições controladas (temperatura a  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e humidade relativa a  $70\pm 5\%$ ). Sobre os moldes coloca-se uma placa plana de vidro e, por cima desta, um pano de turco húmido, garantindo as mesmas condições de cura para todas as situações em análise (Figura 3.8.f).



**Figura 3.9 - Desmoldagem de provetes prismáticos ( $40\times 40\times 160\text{mm}^3$ ). a) Identificação dos provetes de ensaio; b) Pesagem dos provetes de ensaio; c) Imersão dos provetes em água (câmara de cura).**

Os provetes são mantidos nos moldes durante as 24h seguintes ao tempo zero, ao fim das quais se procede à desmoldagem cuidada dos provetes, utilizando um martelo de borracha, de forma a não danificar os provetes e os próprios moldes. Após a identificação (Figura 3.9.a) e pesagem dos provetes prismáticos (Figura 3.9.b), estes são, em seguida, levados, novamente, para a câmara de cura e imersos horizontalmente em água potável ( $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ ), mantendo as faces que eram verticais no molde, verticais. A colocação dos provetes respeita o presente na norma NP EN 196-1 [69], na qual

os provetes assentes sobre a rede devem estar afastados uns dos outros, assegurando o livre acesso da água às seis faces do provete (Figura 3.9.c).

Os provetes permanecem imersos até à realização dos ensaios de caracterização no estado endurecido (Subcapítulo 3.5), correspondentes às várias idades seleccionadas para o estudo da evolução do desempenho, isto é, aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias.

Refira-se que, todas as actividades se realizaram nas mesmas condições ambiente em que os provetes foram produzidos.

#### 3.5.1.1. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS

As propriedades de materiais à base de cimento são passíveis de serem obtidas por meio de ensaios não-destrutivos. Estes são de grande relevância no estudo dos materiais de construção, uma vez que permitem a determinação de propriedades dos materiais, sem alterar as suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir no seu uso posterior. De entre estes, destaca-se a determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sónica nos materiais à base de cimento, a partir da qual se pode verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos internos, uma vez que a velocidade de propagação é determinada pela sua elasticidade e densidade do material e, conseqüentemente, é mais rápida, no meio sólido do que no líquido e no ar. Nesse sentido, pode ser correlacionada com a resistência mecânica do material e permitir o acompanhamento temporal do processo de endurecimento do material [77]. Os ultra-sons são ondas acústicas com frequência acima do limite audível, normalmente, situadas na faixa de 0,5 a 20 kHz.

Através da realização deste ensaio pretende-se determinar a velocidade de propagação das ondas longitudinais de ultra-sons nos materiais à base de cimento que se estão a estudar. A magnitude da velocidade de propagação para materiais à base de cimento depende de vários factores, nomeadamente: do tipo e composição de ligante; da forma de compactação; da idade do material; do meio em que ocorre, sendo mais rápido no meio sólido do que no líquido e no ar; da geometria da amostra; além de características relacionadas com o equipamento de medição, com a precisão do ensaio e com a interface dos transdutores com o material a ser medido [77].

#### ❖ *Normalização e observações ao procedimento*

O procedimento adoptado baseia-se no estabelecido pela norma ASTM C597-09 [78]. O ensaio de determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sónica, por transmissão directa, usado como ensaio complementar, será efectuado nos provetes prismáticos ao fim de 2, 7, 28, 56 e 90 dias

de hidratação da argamassa, tendo como fim constituir um ensaio não destrutivo, para estimar, indirectamente, a resistência mecânica.

Por forma a estudar a relação entre a resposta espectral e a composição do material, ligou-se um osciloscópio ao aparelho de ultra-sons (U.S.). Trata-se de uma técnica, de cariz inovador (ainda em desenvolvimento), que procura aprofundar e melhorar a precisão dos resultados obtidos pelo ensaio com ultra-sons.

### ❖ **Metodologia**

**Quadro 3.12 - Materiais utilizados na determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em provetes prismáticos - estado endurecido.**

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Aparelho ultra-sons (TICO);	- Espátula;	- Vaselina sólida.
- Computador com o <i>software</i> "Open Choice" instalado;	- Pano húmido;	
- Osciloscópio (Tektronix).	- Papel de cozinha;	
	- Tabuleiro.	

A fase inicial deste procedimento consiste na preparação dos provetes, para o ensaio, e na montagem do sistema.

Na data de ensaio retiram-se os provetes necessários da câmara de cura e, após a limpeza das suas faces, pesam-se os provetes. Sobre as amostras, transportadas num tabuleiro para a zona de ensaio, coloca-se um pano húmido por forma a manter as condições idênticas de humidade para todos os provetes até ao momento de ensaio.

Após a ligação dos equipamentos (Figura 3.10.a) segue-se a calibração do aparelho de ultra-sons (Figura 3.10.c) que consiste, basicamente, em assegurar que o tempo decorrido entre as duas extremidades do cilindro de calibração, que distam 0,13m, seja igual a 21,0 $\mu$ s (conforme recomendado pelo fabricante do aparelho de ultra-sons). A aderência entre os topos da barra referida e os transdutores (emissor e receptor) é conseguida pela massa de contacto – vaselina sólida (Figura 3.10.b).

A medição da velocidade de propagação da onda, no cilindro de calibração, deve ser repetida até se obter uma aproximação ao valor da velocidade (recomendado pelo fabricante) considerando-se, então, que o aparelho está calibrado. Após o ajuste das escalas de tensão, tempo e de posição (vertical e horizontal) no osciloscópio, obtém-se a onda longitudinal, que é guardada no programa em *Microsoft Excel*, permitindo posterior análise e tratamento de dados.



Figura 3.10 - Fases do ensaio determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (estado endurecido). a) Montagem e ligação do sistema; b) Aplicação de camada de vaselina no cilindro de referência; c) Calibração do aparelho (cilindro de referência); d) Aplicação de camada de vaselina no provete ensaiado; e) Determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.

O ensaio, propriamente dito, consiste no posicionamento dos transdutores com funções de emissor e receptor em contacto com os extremos de cada provete ensaiado (Figura 3.10.e), cuja distância é 0,16m, e depois accionar o botão para o equipamento emitir um impulso eléctrico de frequência ultra-sónica 45kHz – que é conduzido ao transdutor emissor – gerando uma onda que atravessa o provete e é captada por outro transdutor receptor (também em contacto com a superfície do provete), onde é transformado, novamente, num impulso eléctrico e conduzido de volta ao equipamento que mede directamente o tempo gasto no percurso.

O equipamento, tal como descrito anteriormente, permite introduzir a informação sobre a distância entre os transdutores e dispõe, também, de um *software* que calcula a velocidade aparente de propagação da onda naquele percurso (recorrendo à Equação 3.3.), cujo valor surge no visor.

$$v_{aparente} = \frac{d}{t} \text{ (m/s)} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

sendo,

$v_{aparente}$  - velocidade aparente de propagação da onda ultra-sónica (m/s);

$d$  - distância entre os transdutores (emissor e receptor) (m);

$t$  - tempo decorrido no percurso da onda (s).

Efectuam-se duas leituras para cada provete considerando-se o valor médio da velocidade arredondado à unidade. Refere-se que, entre leituras, os transdutores devem ser afastados dos pontos de medição e voltados a juntar, garantindo um melhor contacto, através da realização de movimentos circulares.

Após o término do ensaio limpa-se, com papel de cozinha, o excedente de vaselina dos extremos dos três provetes prismáticos sujeitos ao ensaio (para cada idade de hidratação).

### 3.5.1.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO E À COMPRESSÃO

As resistências à flexão e compressão são, genericamente, medidas de avaliação do risco de introdução de tensões nos materiais. Neste trabalho, estas medidas serão utilizadas na avaliação da correspondência dos cimentos com incorporação do(s) resíduo(s) com a norma NP EN 197-1, que especifica as propriedades e requisitos dos cimentos correntes.

O ensaio de resistência à flexão consiste na sujeição dos provetes prismáticos, assentes em dois apoios cilíndricos, a forças exercidas a meio vão, gradualmente crescentes, até à rotura. O valor de carga máxima aplicada, antes da rotura é, então adoptada para o cálculo de resistência à flexão dos prismas. Os semi-prismas, resultantes do ensaio de flexão, são submetidos a forças de compressão gradualmente crescentes até à rotura. Este ensaio prevê a aplicação de uma carga à compressão, numa área específica do prisma (40x40mm<sup>2</sup>), até à cedência do material.

#### ❖ **Normalização e observações ao procedimento**

Este ensaio foi realizado de acordo com as indicações da norma NP EN 196-1 [69]. O ensaio de determinação da resistência à flexão foi realizado posteriormente ao ensaio de determinação da velocidade de ultra-sons (Subsecção 3.5.1.1), sobre os mesmos provetes prismáticos. Quanto ao ensaio de determinação da resistência à compressão realiza-se nos semi-prismas resultantes do ensaio de flexão.

❖ **Metodologia****Quadro 3.13 - Materiais utilizados na determinação da resistência mecânica - estado endurecido.**

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Máquina de ensaio de resistência à flexão e à compressão (PERTA).	- Pano húmido; - Pincel de limpeza.	- N/A



Figura 3.11 - Fases do ensaio determinação da resistência mecânica (estado endurecido). a) Máquina de ensaios de resistência mecânica; b) Posicionamento do prisma na máquina de resistência à flexão; c) Accionamento do dispositivo de carga para determinação da resistência à flexão; d) Posicionamento do prisma na máquina de resistência à compressão; e) Accionamento do dispositivo de carga para determinação da resistência à compressão; f) Provetes após ensaio.

No que respeita ao ensaio de resistência à flexão coloca-se cada provete prismático, sobre os dois cilindros de apoio, com as faces laterais de moldagem e o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios (Figura 3.11.b). Faz-se descer o cutelo da máquina até se estabelecer o contacto com a face superior do prisma, a meio vão, aplicando em seguida uma carga gradualmente crescente contínua à velocidade de  $50 \pm 10 \text{ N/s}$ , até à rotura do provete (Figura 3.11.c). No visor, relativo ao ensaio de flexão, obtém-se o valor da força máxima de flexão (N), no momento imediatamente antes da rotura. O procedimento repete-se para os prismas seguintes, tendo-se o cuidado de limpar os cilindros da máquina de ensaio de resistência à flexão, com auxílio de um pincel, entre ensaios. Após o ensaio de flexão, os semi-prismas resultantes deste são sujeitos ao ensaio de compressão. Cada semi-prisma é colocado sobre a placa do prato inferior da máquina, devidamente centrado, por uma das faces laterais de moldagem, na posição longitudinal (Figura 3.11.d). Acciona-se o mecanismo e faz-se descer o prato superior da máquina até este contactar com a face superior da amostra. Aplica-se, em seguida, uma força vertical, aumentando-a uniformemente ao ritmo de  $2400 \pm 200 \text{ N/s}$ , até ocorrer a rotura do provete (Figura 3.11.e). Regista-se o valor lido, relativo à carga máxima aplicada (N).

O procedimento repete-se para os semi-prismas seguintes sendo que, entre ensaios, os pratos da máquina devem ser limpos com o auxílio de um pincel. Não se consideram as amostras que não garantam solidez sobre os pratos da máquina.

#### ❖ *Expressões de cálculo*

A tensão de rotura à flexão é dada pelo quociente que relaciona a carga máxima e a distância entre apoios, com as dimensões laterais do provete (perpendicular e paralela), ao sentido da carga aplicada. O valor da resistência à flexão de cada provete é arredondado a  $0,05 \text{ N/mm}^2$ , sendo a média dos valores arredondada a  $0,1 \text{ N/mm}^2$  (Eq. 3.4.).

$$R_f = 1,5 \cdot \frac{F_f \cdot l}{b \cdot d^2} \text{ (MPa)} \quad \text{(Eq. 3.4)}$$

sendo,

$R_f$  – resistência à flexão (MPa ou  $\text{N/mm}^2$ );

$F_f$  – força de rotura à flexão (N);

$l$  – distância entre apoios (mm);

$b$  – largura do prisma (mm);

$d$  – espessura do prisma (mm).

Por sua vez, a tensão de rotura à compressão é dada pelo quociente entre a carga máxima e a área da secção transversal onde é aplicada a força (Eq. 3.5.).

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ (MPa)} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

sendo,

$R_c$  – resistência à compressão (MPa ou N/ mm<sup>2</sup>);

$F_c$  – força de rotura à compressão (N);

$A$  – área de aplicação de carga (mm<sup>2</sup>).

O valor da força de rotura à compressão de cada amassadura, numa determinada idade, é calculado pela média dos valores individuais, arredondado às décimas. Se um resultado dos semi-prismas variar  $\pm 10\%$  da média suprime-se este resultado e calcula-se a média para os semi-prismas restantes. Se um novo resultado, entre estas cinco determinações, variar  $\pm 10\%$  da média elimina-se toda a série de resultados.

### 3.5.1.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A capacidade de absorção de água é uma das formas de avaliar a estrutura porosa do material, dado que, quanto mais poroso for o material, mais fácil será a percolação da água e a migração de outros compostos químicos, endógenos e exógenos, no seu interior facilitando a ocorrência de reacções químicas de degradação que contribui para uma diminuição da durabilidade.

A absorção de água por capilaridade é determinada pela diferença entre a massa do provete que esteve com uma das faces em contacto com a água, durante um período de tempo e a massa do provete seco, dividida pela área da superfície em contacto com a água. Esta pode ser aferida através da leitura da altura média de ascensão capilar, medida perpendicularmente à face do provete que se encontra em contacto com a água.

Este ensaio, constitui um ensaio físico que, procura apreciar as características de durabilidade dos materiais cimentícios, avaliando de que forma a incorporação de resíduos, como substitutos parciais do cimento, influencia a capacidade de absorção de água por capilaridade.

#### ❖ **Normalização e observações ao procedimento**

O ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade consistiu numa adaptação do procedimento descrito na norma EN 1015-18 [79] tendo, também, em consideração o presente no documento normativo E 393-1993 do LNEC [80].

❖ **Metodologia**

Quadro 3.14 - Materiais utilizados na determinação da absorção de água por capilaridade – estado endurecido.

Equipamentos	Utensílios	Produtos
- Aquário;	- Cronómetro;	- Água destilada 20±2°C.
- Balança (precisão 0,01g);	- Esguicho;	
- Estufa (40±5°C).	- Pano húmido;	
	- Régua.	

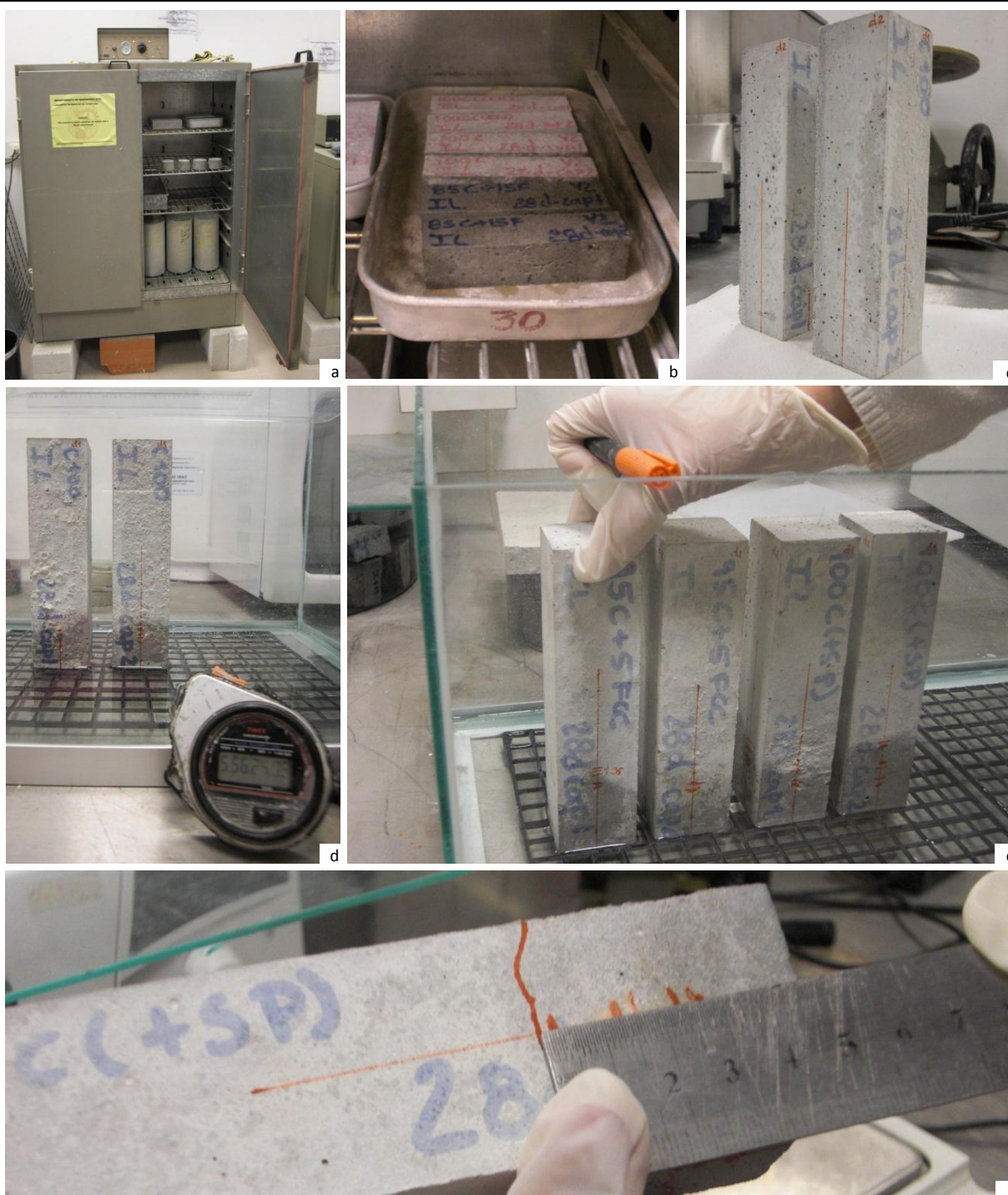


Figura 3.12 - Fases do ensaio determinação da absorção de água por capilaridade (estado endurecido). a) Estufa a 40±5°C; b) Acondicionamento dos provetes a estufa; c) Provetes ensaiados à temperatura ambiente; d) Aquário – sistema utilizado no ensaio; e) Retirar o provete do aquário, para efeito de determinação da massa e altura de ascensão capilar; f) Determinação da altura de ascensão capilar na face (face 1) do prisma.

Após 28 dias de hidratação na câmara de cura, os dois provetes destinados ao ensaio são acondicionados na estufa (Figura 3.12.a), durante 14 dias, à temperatura de  $40\pm 5^\circ\text{C}$  (Figura 3.12.b). Depois deste período, os provetes são retirados e deixados arrefecer em ambiente seco (Figura 3.12.c), até atingirem a temperatura ambiente, após a qual, os prismas são pesados e colocados em posição vertical sobre a rede do aquário, mantendo-se a face inferior em contacto com uma lâmina de água ( $5\pm 1\text{mm}$ ) acima da face inferior do provete. Deve-se ter o cuidado de introduzir os provetes, segundo um ângulo de  $45^\circ$ , de forma a evitar a acumulação de bolhas de ar na face inferior do provete. O aquário é tapado, de modo a minimizar a evaporação de água (Figura 3.12.d), tendo-se a preocupação de abrigar o aquário da luz solar. Durante todo o tempo de imersão deve-se observar periodicamente o nível de água, ajustando-o, conforme necessidade com auxílio de um esguicho.

Efectuaram-se dois tipos de leituras aos 5min, 10min, 15min, 30min, 1h30, 3h, 6h, 8h, 12h, 24h, 48h e 72h, a contar desde a colocação do provete em contacto com água. Cada leitura implica: retirar a tampa de vidro e o provete ensaiado (Figura 3.12.e), secar a água superficial com um pano húmido, avaliando, depois, a sua massa. Mede-se, ainda, a altura de ascensão capilar nas quatro faces perpendiculares à face em contacto com a água, a partir do centro de cada uma das faces em causa, devido ao elevado grau de subjectividade e erro (Figura 3.12.f).

#### ❖ *Expressão de cálculo*

A absorção capilar é uma propriedade que relaciona a quantidade de água absorvida por unidade de área com a raiz quadrada do tempo. Assim, para um dado instante, é determinada dividindo o incremento de massa pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água. O valor da absorção por capilaridade é expresso em  $\text{kg}/\text{m}^2$  para cada tempo  $t_i$ . Os resultados representam-se num gráfico que relaciona a quantidade de água absorvida por unidade de área de base do provete, com a raiz quadrada do tempo decorrido – curva de absorção capilar.

A velocidade de absorção de água nos instantes iniciais é traduzida pelo coeficiente de absorção de água por capilaridade (Eq. 3.6), correspondendo ao declive da recta do troço inicial do gráfico que une os pontos representativos das medições das massas dos prismas realizadas aos 10 e 90 minutos.

$$c = 0,1 \cdot (m_2 - m_1) \quad (\text{kg}/\text{m}^2\text{min}^{1/2}) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

sendo,

$c$  – coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{min}^{1/2}$ );

$m_1$  – massa do provete ensaiado aos 10 min (kg);

$m_2$  – massa do provete ensaiado aos 90 min (kg).

O coeficiente de absorção de água médio é obtido pela média dos dois valores individuais, correspondentes aos provetes ensaiados.

A altura da ascensão capilar, expressa em mm, é obtida através da média aritmética das medições efectuadas nas quatro faces laterais do provete.

# 4

## APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente Capítulo expõem-se os resultados obtidos nos ensaios efectuados na campanha experimental, descritos no capítulo anterior (Capítulo 3). Paralelamente à sua apresentação os registos são alvo de análise, com o intuito de dar resposta às questões que conduziram à realização do presente estudo, isto é, verificar se as misturas de cimento nas quais parte do cimento corrente é substituído por um (ou dois) resíduo(s) sólido(s) industrial(ais), também, correspondem à norma NP EN 197-1 [1] (Subcapítulo 1.3). O tratamento estatístico dos dados permite avaliar a sua precisão, à luz das normas seguidas, e analisar criticamente a dispersão dos valores obtidos.

Através da análise dos resultados pretende-se, ainda, avaliar o efeito da utilização de misturas binárias e ternárias (Subcapítulo 3.1) em função da fracção volúmica de resíduo(s) incorporado(s) e do tempo de hidratação. Para além da avaliação dos resultados obtidos em cada ensaio, estabeleceu-se uma análise comparativa, em termos de interacção das características das pastas e argamassas, na perspectiva de compreender de que forma algumas propriedades se relacionam entre si. Os dados são, também, comparados com outros estudos com incorporação destes resíduos disponíveis na bibliografia.

Os resultados obtidos apresentam-se em tabelas e gráficos concebidos de modo a serem coerentes, tanto no conteúdo como na forma, nomeadamente, as mesmas misturas e idades de hidratação serão sempre representadas com a mesma cor e diferenciadas por “famílias” de composições, conforme definido anteriormente (Subcapítulo 3.1). Neste sentido, para cada ensaio, apresenta-se: uma representação gráfica geral que exhibe os resultados obtidos para todas as composições estudadas, permitindo uma apreciação do comportamento de todas as misturas face à característica avaliada; e, representações parciais (baseadas nessa figura global), para cada família, com o objectivo de analisar individualmente o comportamento apresentado pelas misturas.

O registo integral dos dados obtidos para cada ensaio da campanha experimental, referentes a cada mistura, são apresentados no Anexo C.2 e a análise estatística dos resultados obtidos encontra-se descrita no Anexo D.2.

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Neste Subcapítulo faz-se a exposição e análise dos resultados obtidos, no que diz respeito às pastas e argamassas preparadas (Quadro 3.1) no estado fresco. A descrição das metodologias de ensaio foi apresentada no Subcapítulo 3.4.

### 4.2.1. TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PRESA

Neste Subcapítulo apresentam-se os resultados da avaliação do efeito das diferentes composições no início e fim de presa. Como o ensaio de consistência normal e determinação do início e fim de presa são ensaios complementares e interdependentes [71], definidos anteriormente na Secção 3.4.1, os dados, de ambos os ensaios, são tratados em conjunto.

**Quadro 4.1 - Tempos – início e fim – de presa (min) das pastas de consistência normal das misturas estudadas de acordo com a respectiva família – estado fresco.**

Família	Mistura	Água (g)	t <sub>i</sub>	t <sub>f</sub>	Família	Mistura	Água (g)	t <sub>i</sub>	t <sub>f</sub>	Família	Mistura	Água (g)	t <sub>i</sub>	t <sub>f</sub>
						95C+5FCC(+SP)	130	264	304		80C+5FCC+15rPC(+SP)	117	180	246
						90C+10FCC(+SP)	136	227	297		80C+10FCC+10rPC(+SP)	126	165	215
						85C+15FCC(+SP)	142	201	261		80C+15FCC+5rPC(+SP)	135	175	235
	100C(CEN)	--	--	--		95C+5rPC(+SP)	120	227	307		75C+5FCC+20rPC(+SP)	117	191	266
Referência	100C	140	136	246	Misturas binárias	90C+10rPC(+SP)	116	216	286	Misturas ternárias	75C+10FCC+15rPC(+SP)	125	175	225
	100C(+SP)	200	286	346		85C+15rPC(+SP)	113	175	265		75C+15FCC+10rPC(+SP)	132	146	216
						80C+20rPC(+SP)	111	166	266		70C+5FCC+25rPC(+SP)	115	176	236
						75C+25rPC(+SP)	111	156	216		70C+10FCC+20rPC(+SP)	121	146	211
						70C+30rPC(+SP)	109	156	226		70C+15FCC+15rPC(+SP)	130	135	195

Água - quantidade de água adicionada à mistura para atingir a pasta de consistência normal (g);

t<sub>i</sub> - tempo de início de presa (min);

t<sub>f</sub> - tempo de fim de presa (min).

A norma NP EN 197-1 [1] expõe os requisitos físicos, expressos como valores característicos especificados, na qual se estabelece que, para a classe de resistência de cimento 42,5R, o início de presa deve ocorrer após 60 min. Pela análise do Quadro 4.1, no qual se apresenta a quantidade de água necessária às pastas para atingirem a consistência normal, bem como, os tempos de início e fim de presa, verificados para cada mistura, observa-se que todas as pastas com substituição parcial de cimento por resíduo(s) sólido(s) industrial(ais) estão dentro deste intervalo. Isto é, a incorporação de

resíduo(s) nas misturas testadas (Quadro 3.1) cumpre o requisito, em termos de tempo de início de presa, para o cimento cuja classe de resistência é 42,5R.

(i) Observações à família de referência:

Segundo a análise dos dados referentes à família de referência, presentes no Quadro 4.1 (apresentado anteriormente), observa-se, pela comparação da mistura 100C e 100C(+SP), que a incorporação de superplastificante diminui a quantidade de água necessária a adicionar à pasta para que esta atinja a consistência normal. Verifica-se, também, que o superplastificante retarda o início de presa, ou seja, atrasa em cerca de 2h30 o início de perda de plasticidade, registrando-se que a pasta 100C(+SP) começa a endurecer ao fim de, aproximadamente, 4h45min.

Considerando o intervalo de trabalhabilidade, como o período de tempo entre o início e fim de presa, observa-se que o superplastificante contribui, significativamente, para a redução do período de trabalhabilidade comparativamente à pasta formada pela mistura de referência sem superplastificante, 100C.

(ii) Observações à família das misturas binárias:

As Figuras 4.1 e 4.2 representam os tempos de início e fim de presa, bem como, a quantidade de água adicionada à mistura até se atingir esta pasta de consistência normal para as misturas binárias com substituição de cimento, respectivamente, por catalisador exausto de FCC ou por resíduo de pedra natural calcária.

Segundo a apreciação da Figura 4.1 observa-se que a introdução de resíduo de FCC aumenta, gradualmente, a necessidade de adição de água à mistura para que se atinja a pasta de consistência desejada. Esta tendência é confirmada pela correlação linear, muito próxima da unidade ( $R^2=0,99$ ), representada na mesma figura. Os resultados eram esperados, tendo em consideração os registos e as observações efectuadas para o ensaio de determinação de consistência por espalhamento, na qual, se evidencia a contribuição significativa deste resíduo na perda de trabalhabilidade, dada a sua apetência para fixar água (Figura 4.6).

O catalisador exausto da indústria petroquímica, quando incorporado nas pastas em substituição parcial do cimento corrente, gera um efeito de acelerador dos tempos – início e fim – de presa registrando-se, à medida que aumenta o teor de incorporação, que o tempo de início de presa diminui. Através do traçado das rectas de ajuste linear, representadas na Figura 4.1, verifica-se a existência de elevada correlação linear entre a incorporação de resíduo e o encurtamento dos tempos de início ( $R^2=0,99$ ) e fim de presa ( $R^2=0,94$ ).

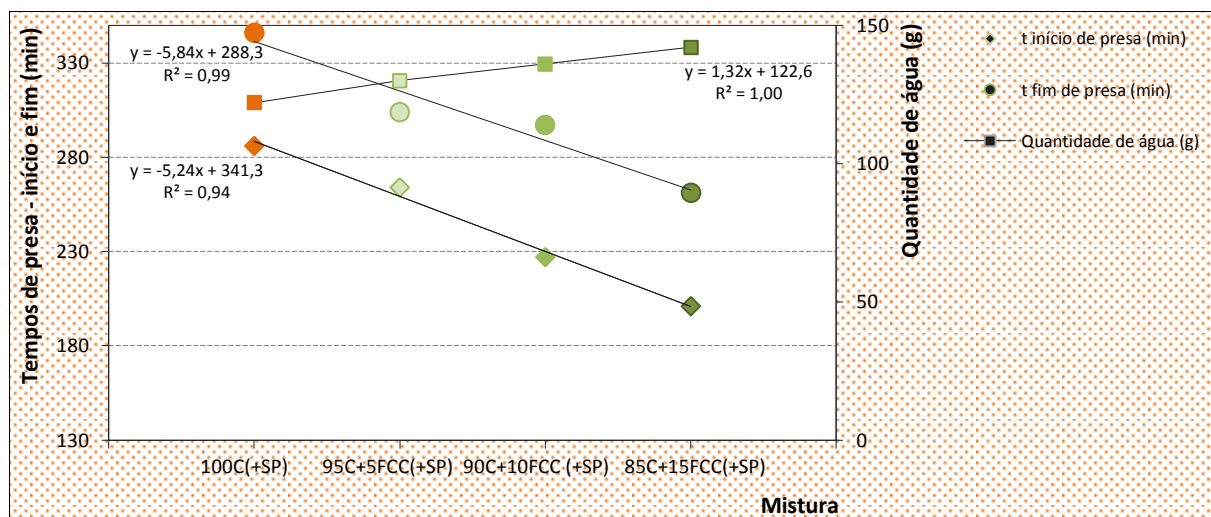


Figura 4.1 - Tempos – início e fim – de presa (min) das pastas de consistência normal com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre os tempos de presa e a quantidade de água, em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC).

Apesar da amplitude do intervalo de trabalhabilidade não sofrer alterações significativas, consoante a variação do teor de resíduo incorporado, observa-se que a pasta com 10% de resíduo apresenta maior período de trabalhabilidade.

Constata-se que, para a percentagem de substituição máxima ensaiada (15%), obtém-se o mesmo período de trabalhabilidade que a adquirida para a pasta de referência sem substituição parcial de cimento por resíduo – 100C(+SP).

Resultados obtidos por outros autores [42,44,43] revelaram que pastas com percentagens de incorporação de resíduo de FCC baixas (na ordem dos 5%) induzem a aceleração do tempo de presa. Neste estudo verifica-se, gradualmente, uma diminuição do tempo de rigidificação, para teores de substituição, deste resíduo, até 15%.

O aumento do teor de substituição de cimento corrente por resíduo de pedra natural diminui a necessidade de adição de água por forma a se atingir a pasta de consistência normal. Esta correlação linear está patente na Figura 4.2. Segundo o exposto, anteriormente, e os registos obtidos no ensaio de trabalhabilidade, realizado no estado fresco (Figura 4.6), este resultado era esperado dado o efeito *filler* apresentado pelo material.

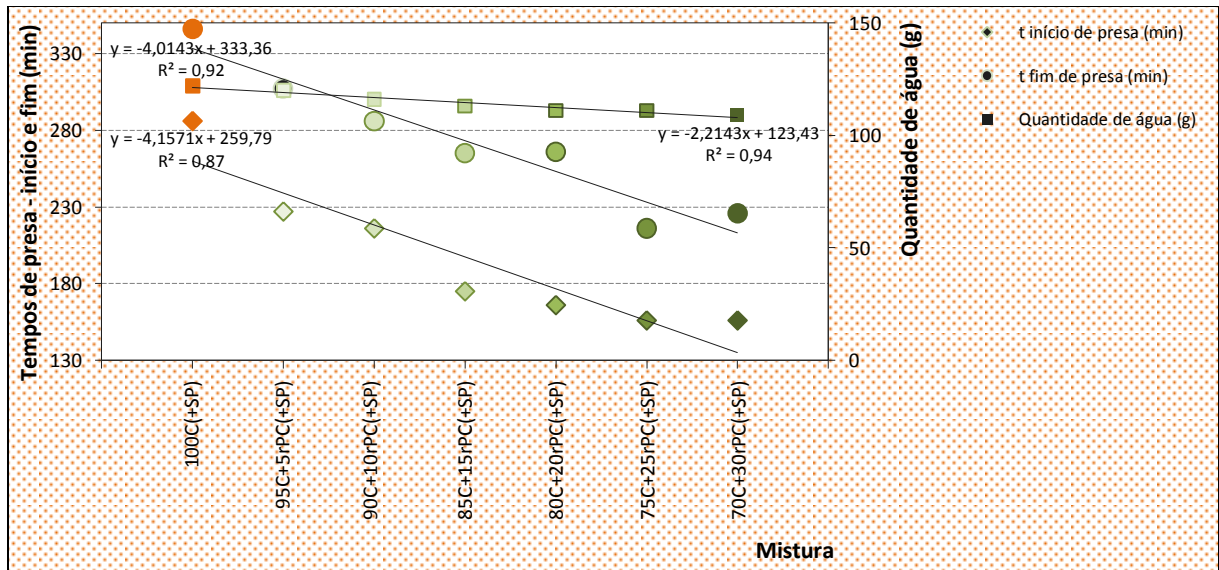


Figura 4.2 - Tempos – início e fim - de presa (min) das pastas de consistência normal com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre os tempos de presa, e a quantidade de água, em função da percentagem incorporação de resíduo de pedra natural.

Verifica-se, também, pela análise da Figura 4.2 uma tendência para este resíduo acelerar os tempos de presa. As rectas de ajuste e respectivas expressões das equações demonstram a correlação linear entre os tempos – início e fim – de presa e o aumento do teor de resíduo incorporado. Observa-se, ainda, que a mistura binária com incorporação de 25% de resíduo de pedra natural de natureza calcária apresenta o mesmo intervalo de trabalhabilidade que a mistura de referência sem substituição - 100C(+SP).

(iii) Observações à família das misturas ternárias:

A Figura 4.3 ilustra os tempos de presa das pastas, pertencentes à família das misturas ternárias, de consistência normal.

Constata-se para todas as percentagens de substituição, o aumento da necessidade de adição de água à mistura, para se obter a pasta de consistência normal (Subsecção 3.4.1), à medida que aumenta o teor de resíduo de FCC (e se diminui, consecutivamente, a incorporação de resíduo de pedra natural) verificando-se, deste modo, o efeito predominante do resíduo de FCC no comportamento das misturas. Esta análise é confirmada, pelas correlações lineares perfeitas ( $R^2=1$ ), obtidas após o traçado das linhas de tendência, representadas na Figura 4.3.

As misturas ternárias com substituição parcial de 20, 25 e 30% de cimento por resíduos evidenciam comportamento idêntico, ao verificado para as misturas binárias com substituição parcial de cimento

por catalisador exausto de FCC, observando-se que com o aumento de resíduo de FCC (e sucessiva diminuição de *filler*), se regista uma diminuição progressiva dos tempos - início e fim - de presa.

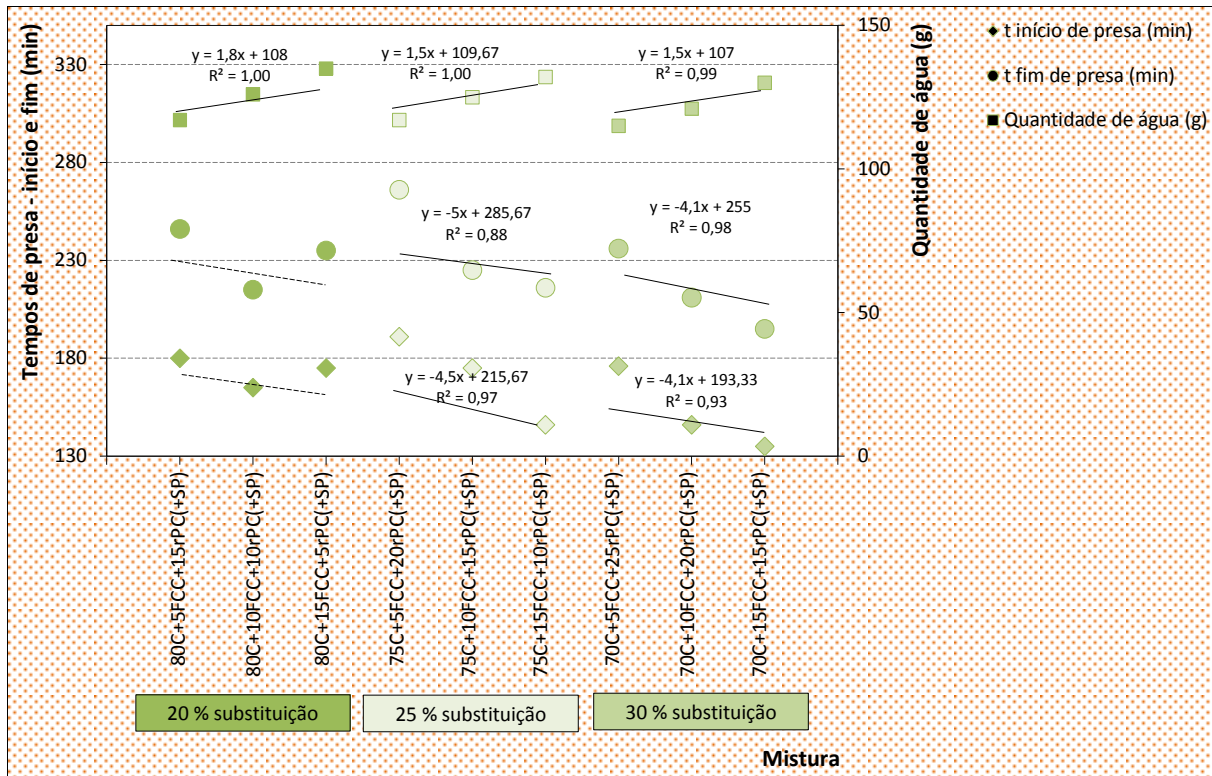


Figura 4.3 - Tempos – início e fim – de presa (min) das pastas de consistência normal da família das misturas ternárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre os tempos de presa, e a quantidade de água, em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC. A tracejado está representada a linha de tendência entre os tempos de presa, em função da percentagem de incorporação de 20% de resíduos, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).

Os dados recolhidos estão em concordância com o observado no ensaio de trabalhabilidade, apresentado posteriormente na Figura 4.5, no qual, para maiores teores de incorporação de resíduo de FCC registam-se menores trabalhabilidades e maiores necessidades de adição de água à mistura, para atingir a pasta de consistência desejada.

#### 4.2.2. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

Este ensaio permite apurar a consistência por espalhamento das misturas realizadas, uma vez que esta é uma forma de avaliar a trabalhabilidade das argamassas frescas.

Neste trabalho, o ensaio de consistência por espalhamento, apresentado na Secção 3.4.2, foi realizado para dois fins: (i) estabelecer a quantidade de superplastificante a adicionar às misturas que se pretendiam estudar e, (ii) depois disso, avaliar o efeito da substituição de cimento pelo(s)

resíduo(s) estudado(s) na trabalhabilidade de argamassas preparadas com a incorporação de superplastificante, determinada no passo anterior.

❖ **Estabelecimento da quantidade de superplastificante a adicionar às misturas**

A incorporação de resíduo de FCC, como substituto parcial do cimento, traduz-se na perda progressiva de trabalhabilidade das argamassas [7,43,44,54] à medida que o teor de resíduo incorporado aumenta. Por este motivo, esperar-se-ia que a mistura 85C+15FCC, de entre as estudadas (Quadro 3.1), fosse conducente à menor fluidez. Tal como explicado anteriormente (Subcapítulo 3.2), este facto, conduz à necessidade de adicionar um superplastificante às misturas para preparar argamassas homogêneas com teor de incorporação de resíduo superior.

Na fase inicial da campanha experimental, a estratégia de determinação da quantidade de superplastificante - SikaPlast 898 - a adicionar às misturas passou pela preparação de diversas argamassas de uma dose para a mistura 85C+15FCC, com diferentes quantidades de superplastificante, até se atingir o mesmo ( $\pm 5$ mm) resultado de diâmetro de espalhamento que, previamente, se tinha obtido com a argamassa de referência (100C). A Figura 4.4 ilustra os valores de consistência por espalhamento obtidos para a argamassa da mistura de referência, 100C, e com a mistura 85C+15FCC, com diferentes teores de superplastificante.

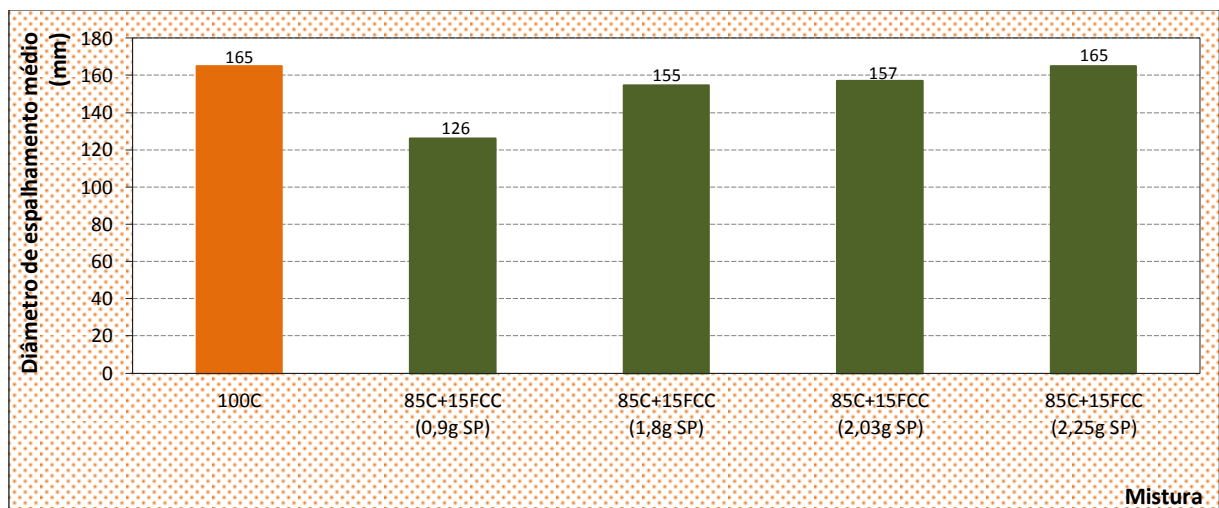


Figura 4.4 - Consistência obtida por espalhamento (mm) da mistura de referência, 100C, e das misturas 85C+15FCC, testadas, para diferentes incorporações de superplastificante (SikaPlast 898) – estado fresco.

Da análise da Figura 4.4 observa-se que, tal como seria de esperar, a trabalhabilidade da argamassa da mistura 85C+15FCC aumenta à medida que se adiciona mais superplastificante à mistura, verificando-se que, para obter o diâmetro de espalhamento da argamassa de referência 100C, é necessário adicionar 2,25g de superplastificante, o que corresponde a 0,5% (em massa). Na

preparação da argamassa esta quantidade de superplastificante conduziu à obtenção de uma argamassa com a consistência pretendida (fácil manuseamento) de aspecto homogêneo e coeso.

Após a determinação da quantidade de superplastificante necessária repetiu-se a amassadura, por forma a comprovarem-se os valores obtidos, e efectuou-se uma amassadura de 4 doses, para as misturas em estudo (100C e 85C+15FCC(+SP)), que permitiu confirmar que, para diferentes dosagens, se obtinham valores de diâmetro comparáveis.

❖ **Resultados obtidos na mesa de espalhamento com as argamassas das misturas em estudo**

A representação gráfica (Figura 4.5) e o Quadro 4.2 apresentam o diâmetro de espalhamento médio, observados no ensaio de consistência por espalhamento, para todas as misturas estudadas que serão, posteriormente, alvo de análise individual, de acordo com a respectiva família.

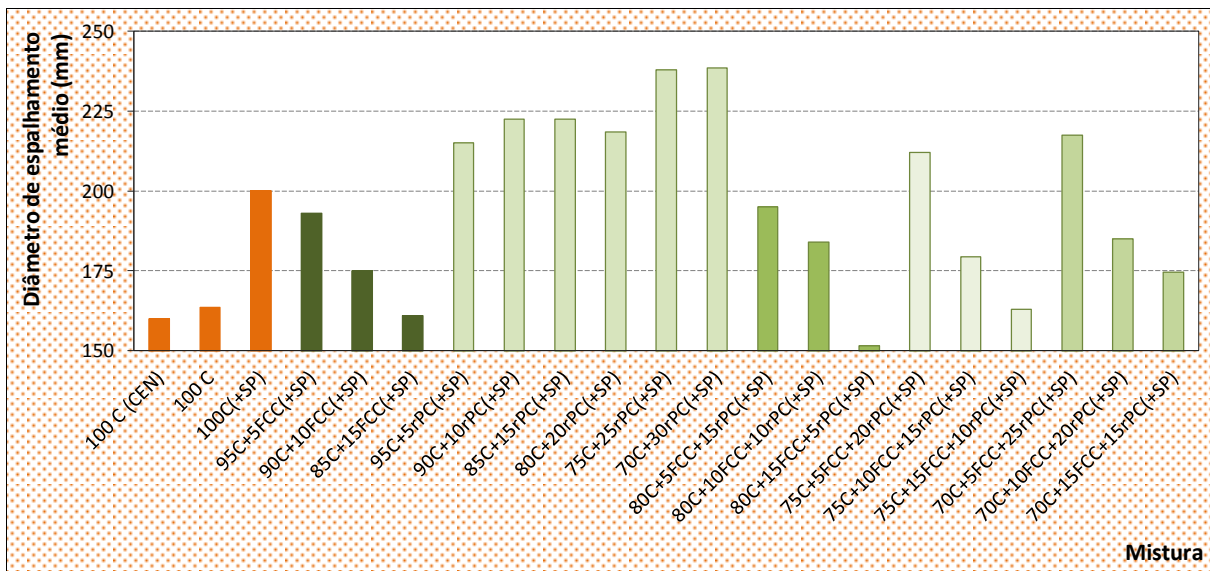


Figura 4.5 - Consistência obtida por mesa de espalhamento (mm) das argamassas das misturas estudadas – estado fresco.

Quadro 4.2 - Consistência obtida por espalhamento (mm) das argamassas das misturas estudadas, de acordo com a respectiva família – estado fresco.

Família	Mistura	d <sub>m</sub> (mm)	Família	Mistura	d <sub>m</sub> (mm)	Família	Mistura	d <sub>m</sub> (mm)
				95C+5FCC(+SP)	193		80C+5FCC+15rPC(+SP)	195
				90C+10FCC(+SP)	175		80C+10FCC+10rPC(+SP)	184
				85C+15FCC(+SP)	161		80C+15FCC+5rPC(+SP)	152
	100C(CEN)	160		95C+5rPC(+SP)	215		75C+5FCC+20rPC(+SP)	212
Referência	100C	164	Misturas binárias	90C+10rPC(+SP)	223	Misturas ternárias	75C+10FCC+15rPC(+SP)	180
	100C(+SP)	200		85C+15rPC(+SP)	223		75C+15FCC+10rPC(+SP)	163
				80C+20rPC(+SP)	219		70C+5FCC+25rPC(+SP)	212
				75C+25rPC(+SP)	238		70C+10FCC+20rPC(+SP)	180
				70C+30rPC(+SP)	239		70C+15FCC+15rPC(+SP)	163

d<sub>m</sub> - diâmetro médio (mm).

Numa apreciação global do Quadro 4.2 observa-se que, a argamassa conducente ao menor valor de fluidez, não se verifica para a mistura 85C+15FCC(+SP), como considerado inicialmente, mas verifica-se para a argamassa da mistura 80C+15FCC+5rPC(+SP), correspondente à substituição de 20% de resíduos sólidos industriais, dos quais 15% são FCC, e os restantes de pedra natural calcária.

(i) Observações à família de referência:

Pela análise dos dados referentes à família de referência, presentes no Quadro 4.2, observa-se que a argamassa produzida com areia normalizada comercial, 100C(CEN), apresenta diâmetro de espalhamento ligeiramente inferior comparativamente à argamassa 100C, produzida com areia normalizada misturada em laboratório. Este facto evidencia que, embora em pequenas quantidades, a areia normalizada comercial tem maior capacidade de absorver água, ou seja, no caso de repetição das amassaduras com a areia CEN, obter-se-iam valores de espalhamento menores.

Constata-se, também, que a argamassa de referência com superplastificante, 100C(+SP), apresenta maior fluidez comparativamente à argamassa de referência sem este (100C), tal como seria de esperar, uma vez que, segundo a própria descrição do produto, o superplastificante, quando adicionado confere trabalhabilidade superior (Anexo B.4).

(ii) Observações à família das misturas binárias:

Na Figura 4.6 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de determinação da consistência por espalhamento para a família das misturas binárias.

Da análise da representação gráfica observa-se que a substituição parcial do cimento por catalisador exausto de FCC traduz-se numa perda progressiva de fluidez, à medida que aumenta teor de resíduo incorporado, conduzindo a valores de espalhamento inferiores comparativamente à mistura de referência - 100C(+SP). Segundo o traçado da recta de ajuste verifica-se uma elevada correlação linear, muito próxima da unidade ( $R^2=0,98$ ), entre a trabalhabilidade das argamassas e o aumento da percentagem de substituição do cimento por este resíduo. O observado está de acordo com os resultados obtidos por outros experimentadores [7,43,44,54] que constataram que a incorporação deste resíduo, de elevada área superficial, na matriz cimentícia reflecte-se na perda de trabalhabilidade da argamassa fresca (Secção 2.4.1).

Na análise dos dados presentes na Figura 4.6, referentes às misturas binárias, nas quais se substituiu parcialmente o cimento por resíduo de pedra natural, observa-se que a incorporação deste resíduo origina argamassas mais fluídas comparativamente à argamassa de referência com superplastificante, 100C(+SP).

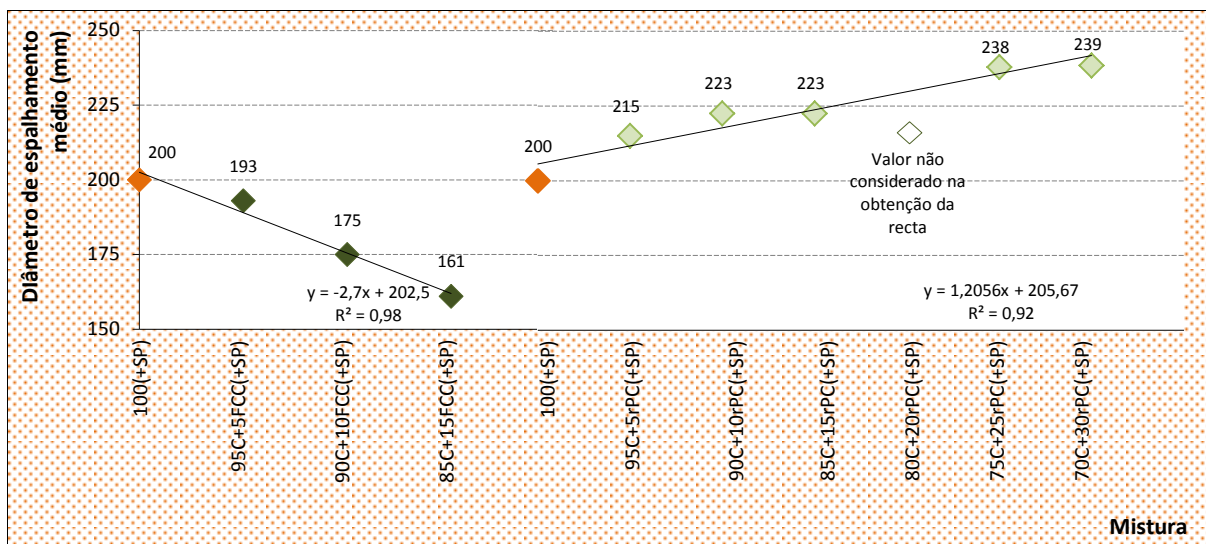


Figura 4.6 - Consistência obtida por espalhamento (mm) e respectiva recta de regressão linear das argamassas da família das misturas binárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a consistência obtida por espalhamento em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC ou de resíduo de pedra natural).

Verifica-se uma tendência para o aumento do espalhamento com o incremento de *filler*. No entanto, considerando toda a série de resultados, não se detecta uma variação linear entre o espalhamento e o teor de resíduo de pedra natural incorporado. Constata-se que este ensaio forneceu um valor atípico, para a mistura binária com substituição de 20% de cimento corrente por resíduo de pedra natural, observando-se mesmo a “olho nu”, aquando a preparação da argamassa, um aumento não esperado da consistência da argamassa. Pelo traçado da recta de regressão linear, para as restantes misturas (excluindo a composição 80C+20rPC(+SP)), obtém-se uma melhor correlação ( $R^2=0,92$ ) do que a verificada, anteriormente, evidenciando que este valor constitui uma excepção à qual seriam necessários outros métodos de análise (por exemplo análise química ou microscópica) para avaliar este resultado. Verifica-se, segundo a inclinação das rectas de tendência, que a trabalhabilidade das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de pedra natural não apresenta variações significativas (Figura 4.6).

Durante a preparação das argamassas notou-se uma melhoria significativa da trabalhabilidade (plasticidade-coesão sem segregação) destas, com o aumento da quantidade de *filler* incorporado. Esta tendência pode atribuir-se: às características do resíduo, nomeadamente, no que respeita à composição, dimensão, forma e à textura das partículas [61,62,63,64]; ou, ainda, à maior compatibilidade entre o cimento com incorporação deste resíduo e o superplastificante. Seriam necessários ensaios complementares para confirmar qual das hipóteses é a mais proeminente.

(iii) Observações à família das misturas ternárias:

Segundo a análise do Quadro 4.2, apresentado anteriormente, a incorporação de resíduo catalisador da indústria petroquímica e resíduo de pedra natural calcária, origina argamassas de trabalhabilidade inferior do que aquelas que contêm apenas resíduo de pedra natural. Verifica-se que, em relação à argamassa de referência, 100C(+SP), apenas as misturas 70C+5FCC+25rPC(+SP) e 75C+5FCC+20rPC(+SP) apresentam maior fluidez.

Na Figura 4.7 representam-se os diâmetros de espalhamento médios, observados no ensaio de consistência por espalhamento, para as misturas ternárias. Segundo a análise da Figura 4.7 verifica-se, para cada conjunto de misturas ternárias avaliadas (substituição global de cimento por 20, 25 e 30% de resíduos sólidos industriais), boas correlações entre os valores de consistência por espalhamento e a variação das proporções dos resíduos de FCC e de pedra natural.

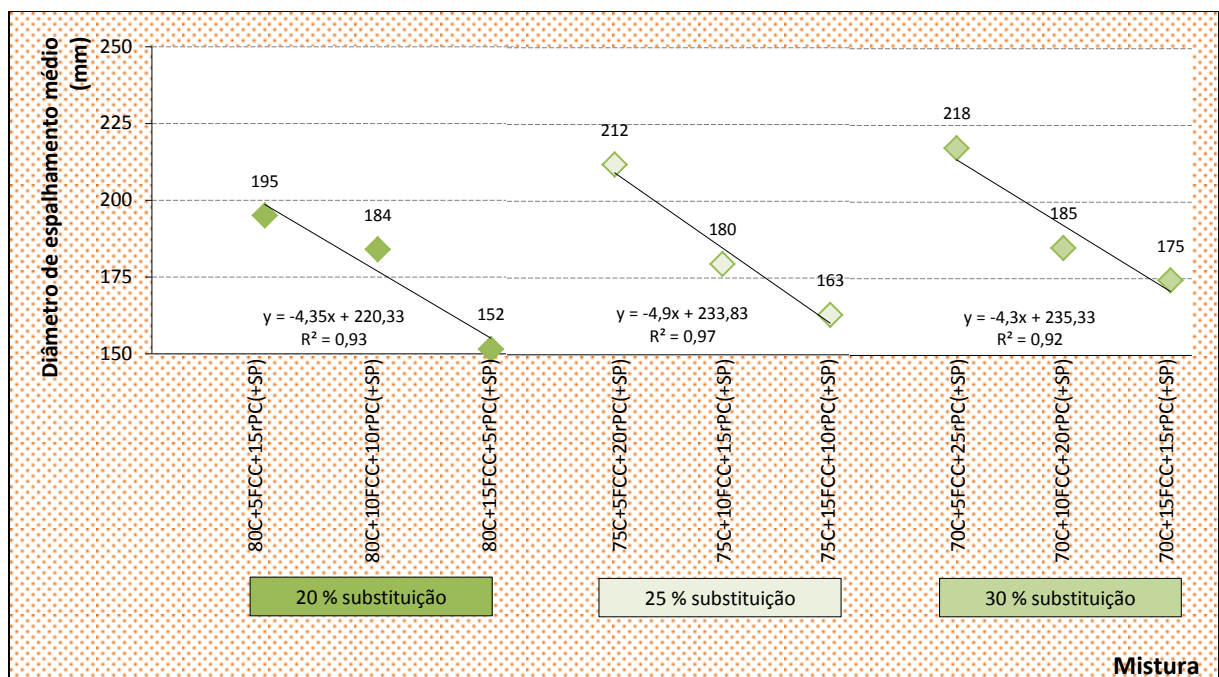


Figura 4.7 - Consistência obtida por espalhamento (mm) e respectiva recta de regressão linear das argamassas da família das misturas ternárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a consistência obtida por mesa de espalhamento, em função da percentagem de incorporação de resíduos).

Os resultados obtidos estão conforme as apreciações efectuadas, anteriormente, para cada uma das “famílias” binárias estudadas (Figura 4.6) nas quais, a influência do aumento do teor de resíduo de FCC é superior à variação induzida pelo outro resíduo, embora actuem em sentidos contrários. Na prática, estes dois resíduos, têm efeitos antagónicos, em termos de trabalhabilidade das argamassas

em que são incorporados, pois a adição de resíduo de FCC traduz-se na perda de trabalhabilidade, enquanto, a incorporação de resíduo de pedra de natureza calcária conduz ao aumento da fluidez.

#### 4.2.3. MASSA VOLÚMICA

A Figura 4.8 e o Quadro 4.3 exibem as massas volúmicas das argamassas frescas estudadas que serão apreciadas, individualmente, em conformidade com a família a que pertencem. Em termos gerais, observa-se que as composições apresentam massas volúmicas idênticas, verificando-se que a substituição de cimento por resíduos conduz a massas volúmicas ligeiramente inferiores.

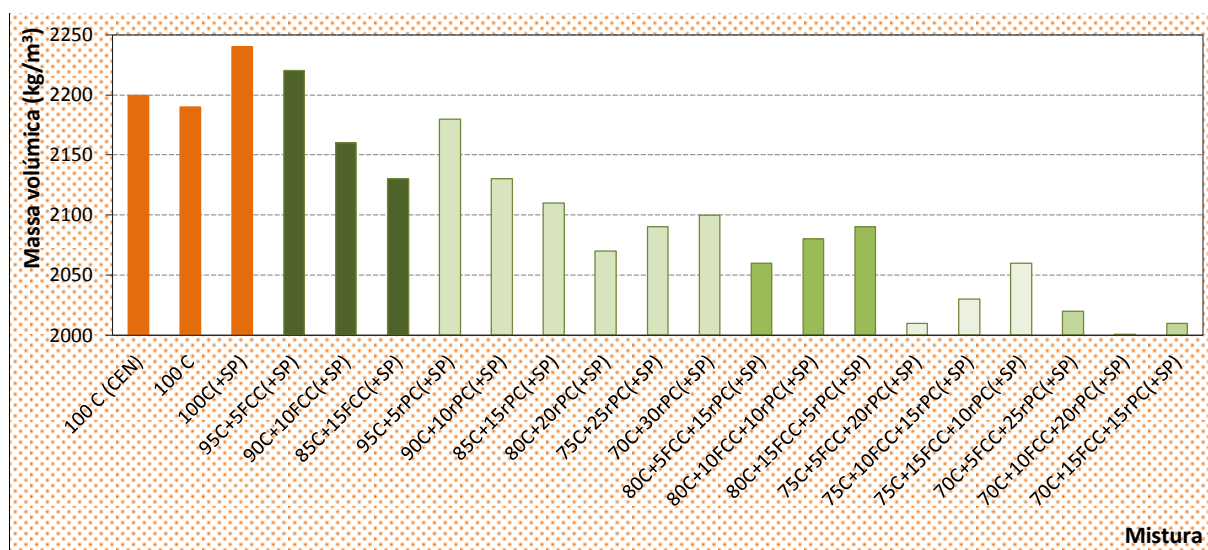


Figura 4.8 - Massa volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) das argamassas das misturas estudadas – estado fresco.

Quadro 4.3 - Massa volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) das argamassas das misturas estudadas de acordo com a respectiva família – estado fresco.

Família	Mistura	$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Família	Mistura	$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Família	Mistura	$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Referência	100C(CEN)	2200	Misturas binárias	95C+5FCC(+SP)	2220	Misturas ternárias	80C+5FCC+15rPC(+SP)	2060
	100C	2190		90C+10FCC(+SP)	2160		80C+10FCC+10rPC(+SP)	2080
	100C(+SP)	2240		85C+15FCC(+SP)	2130		80C+15FCC+5rPC(+SP)	2090
				95C+5rPC(+SP)	2180		75C+5FCC+20rPC(+SP)	2010
				90C+10rPC(+SP)	2130		75C+10FCC+15rPC(+SP)	2030
				85C+15rPC(+SP)	2110		75C+15FCC+10rPC(+SP)	2060
				80C+20rPC(+SP)	2070		70C+5FCC+25rPC(+SP)	2020
				75C+25rPC(+SP)	2090		70C+10FCC+20rPC(+SP)	2000
				70C+30rPC(+SP)	2100		70C+15FCC+15rPC(+SP)	2010

$\rho$  – massa volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

(i) Observações à família de referência:

Pela observação dos dados das massas volúmicas pertencentes à família das misturas de referência, presentes no Quadro 4.3, observa-se que a argamassa preparada com a areia comercial normalizada,

100C(CEN) conduz à obtenção de massa volúmica superior, em aproximadamente  $10 \text{ kg/m}^3$ , comparativamente à mistura 100C. Consta-se, ainda, que a argamassa sem incorporação de resíduos e sem superplastificante, 100C, apresenta menor massa volúmica que a argamassa sem incorporação de resíduos à qual se adicionou superplastificante - 100C(+SP), sendo esta diferença de  $50 \text{ kg/m}^3$ .

(ii) Observações à família das misturas binárias:

A Figura 4.9 apresenta os registos da massa volúmica obtida para as argamassas da família de misturas binárias, com substituição parcial de cimento corrente por resíduo de FCC ou por resíduo de pedra natural.

Pela observação (Figura 4.9) da representação detecta-se que as argamassas com substituição de cimento corrente por resíduo de FCC possuem, uma menor massa volúmica comparativamente à argamassa de referência - 100C(+SP). Verifica-se uma elevada correlação linear ( $R^2=0,96$ ) entre a diminuição da massa volúmica das argamassas e o aumento de incorporação de catalisador exausto de FCC.

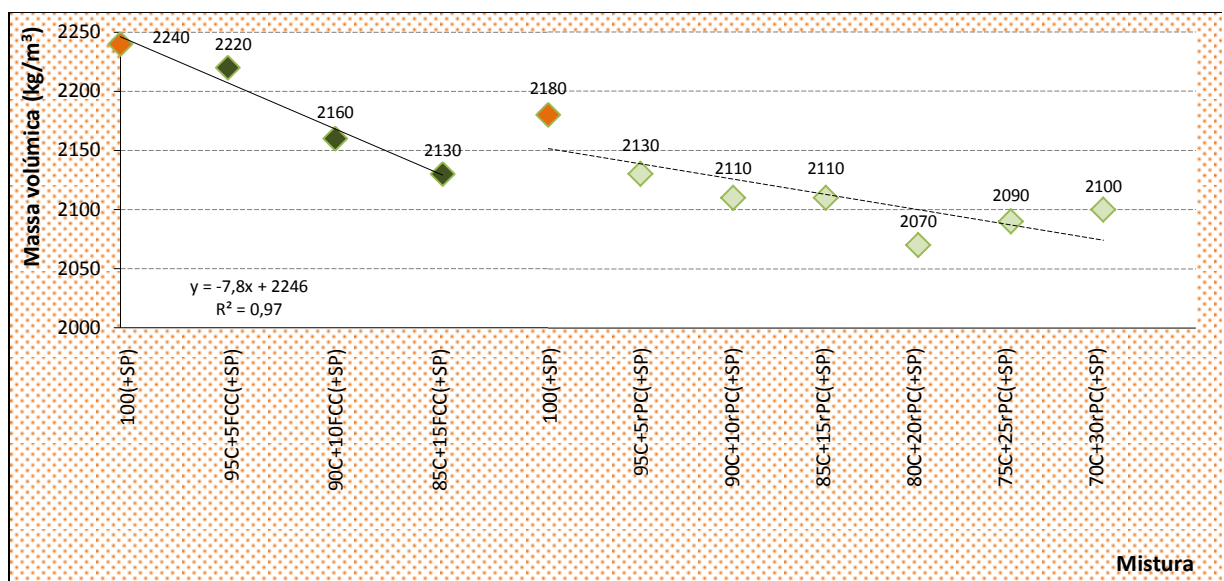


Figura 4.9 - Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) e respectivas rectas de regressão linear das argamassas da família das misturas binárias – estado fresco. (A recta representada, e a respectiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC. A tracejado está representada a linha de tendência entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduo de pedra natural, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).

Da análise da Figura 4.9 observa-se que, a composição de cimento com 5% de resíduo da indústria petroquímica apresenta, de entre as misturas estudadas, maior massa volúmica, ainda assim, de valor inferior (em cerca de  $15 \text{ kg/m}^3$ ) relativamente à argamassa de referência - 100C(+SP).

Neste estudo verifica-se, à medida que aumenta a incorporação de resíduo de FCC, uma diminuição da massa volúmica e da consistência por espalhamento (Figura 4.5), tendo esta relação sido verificada por outros autores [81]. Estes resultados, também, estão de acordo com o facto de o resíduo de FCC apresentar uma estrutura interna muito porosa que se traduz na diminuição da massa volúmica com o aumento da percentagem de substituição.

Da análise dos registos, presentes na Figura 4.9, referentes às misturas binárias, nas quais se substituiu parcialmente o cimento por *filler* calcário, observa-se que estas argamassas possuem massa volúmica inferior comparativamente à argamassa de referência, 100C(+SP).

Globalmente observa-se a diminuição da massa volúmica com o incremento do resíduo de pedra natural, embora, para teores de substituição iguais ou superiores a 20%, se verifique uma inversão desta tendência detectada pelo ligeiro aumento da massa volúmica (Quadro 4.3). Constata-se, segundo a apreciação da linha de tendência traçada, que não existe uma correlação entre a massa volúmica e o aumento do teor de substituição deste resíduo (Figura 4.9).

Os resultados observados podem ser justificados pela diminuição do teor de água das argamassas e pela ocorrência do efeito de *filler*, isto é, os finos incorporados na mistura preenchem os espaços vazios existentes, aumentando a compacidade da argamassa [82].

### (iii) Observações à família das misturas ternárias:

Na Figura 4.10 apresenta-se a massa volúmica das misturas ternárias, bem como as rectas e respectivas relações lineares verificadas entre a massa volúmica e a percentagem de incorporação de resíduos. Observa-se que, genericamente, as misturas ternárias apresentam massas volúmicas inferiores às verificadas nas misturas com substituição parcial do cimento corrente por apenas um dos resíduos (Figura 4.8), à excepção das misturas 80C+15FCC+5rPC(+SP) e 80C+10FCC+10rPC(+SP).

No geral, à medida que aumenta a percentagem de substituição do cimento por resíduos sólidos industriais verifica-se uma diminuição da massa volúmica das respectivas argamassas. De entre as misturas estudadas a conducente ao menor valor de massa volúmica é a que apresenta substituição de 30% de resíduos sólidos industriais, dos quais, 10% são de resíduo de FCC e os restantes pedra natural.

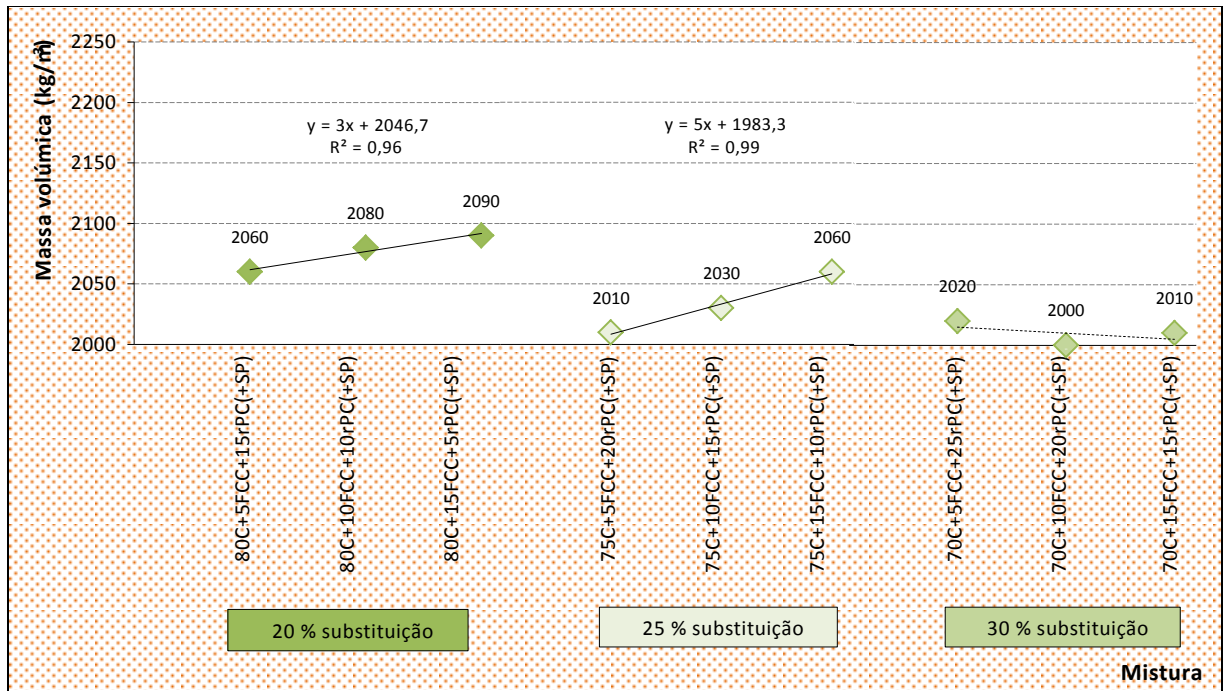


Figura 4.10 - Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) das argamassas da família das misturas ternárias. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduos – estado fresco. A tracejado está representada a linha de tendência entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduos de 30%, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).

As argamassas das misturas nas quais 20 e 25% do cimento corrente foi substituído por resíduos apresentam tendências de variação idênticas, ou seja, para a mesma percentagem de substituição, o aumento de incorporação de resíduo de FCC (e conseqüente diminuição do teor de resíduo de pedra natural) manifesta-se no aumento da massa volúmica. Aparentemente, nestes casos, o *filler* tem um papel preponderante sobre as misturas, constatando-se que, quanto maior a adição deste resíduo nas misturas ternárias, maiores são os valores de massa volúmica – este efeito sinérgico, no entanto, não verificado para as misturas binárias, para ser comprovado, necessitaria da realização de outros ensaios (Figura 4.10).

#### 4.2.4. TEOR DE AR

Este ensaio teve como intuito determinar o volume de ar contido nas misturas. De modo a alargar a análise compararam-se e relacionam-se os dados obtidos com os observados no ensaio de massa volúmica.

Na Figura 4.11 e no Quadro 4.4 apresentam-se os registos do teor de ar, efectuados para cada mistura estudada, sendo estas, posteriormente, analisadas, individualmente, em conformidade com a família em que estão inseridas. Numa primeira abordagem, observa-se (Figura 4.11) que a

substituição parcial de cimento por resíduo(s) industrial(ais) origina argamassas com teor de ar superior (exceptua-se a mistura 80C+20rPC(+SP)) comparativamente à argamassa de referência – 100C(+SP).

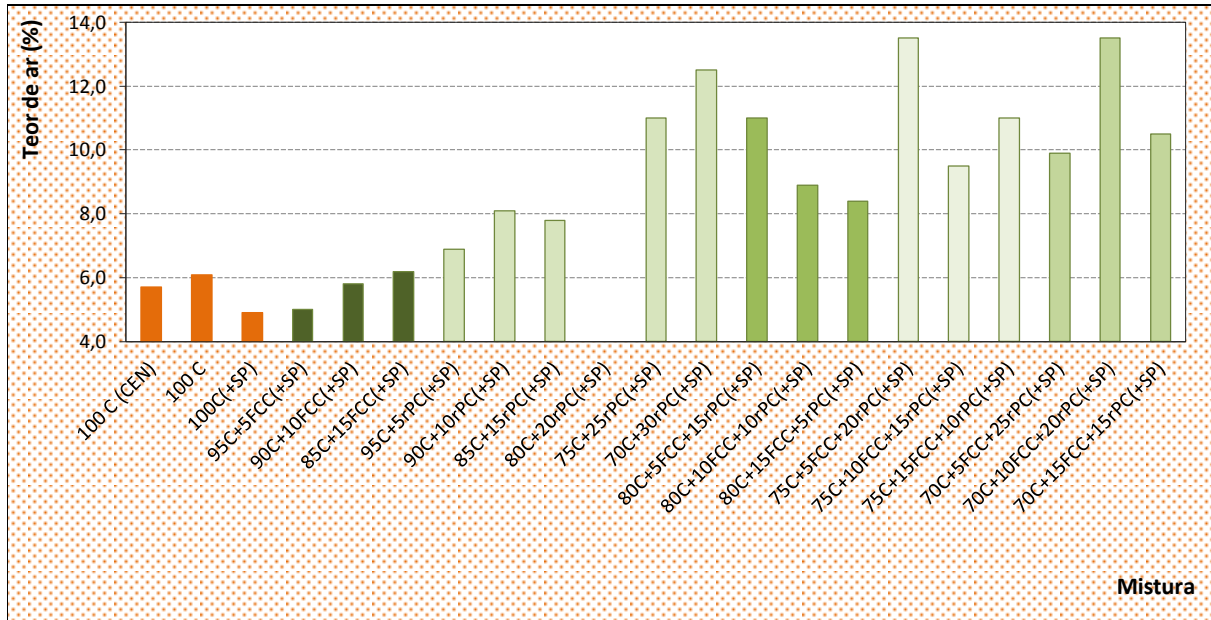


Figura 4.11 - Teor de ar (%) das argamassas das misturas estudadas – estado fresco.

Quadro 4.4 - Teor de ar (%) das argamassas das misturas estudadas de acordo com a respectiva família – estado fresco.

Família	Mistura	Teor de ar (%)	Família	Mistura	Teor de ar (%)	Família	Mistura	Teor de ar (%)
Referência	100C(CEN)	5,7	Misturas binárias	95C+5FCC(+SP)	5,0	Misturas ternárias	80C+5FCC+15rPC(+SP)	11,0
	100C	6,1		90C+10FCC(+SP)	5,8		80C+10FCC+10rPC(+SP)	8,9
	100C(+SP)	4,9		85C+15FCC(+SP)	6,2		80C+15FCC+5rPC(+SP)	8,4
				95C+5rPC(+SP)	6,9		75C+5FCC+20rPC(+SP)	13,5
				90C+10rPC(+SP)	8,1		75C+10FCC+15rPC(+SP)	9,5
				85C+15rPC(+SP)	7,8		75C+15FCC+10rPC(+SP)	11,0
				80C+20rPC(+SP)	4,0		70C+5FCC+25rPC(+SP)	9,9
				75C+25rPC(+SP)	11,0		70C+10FCC+20rPC(+SP)	13,5
				70C+30rPC(+SP)	12,5		70C+15FCC+15rPC(+SP)	10,5

(i) Observações à família de referência:

Pela observação dos registos de teor de ar das misturas pertencentes à família de referência, presentes no Quadro 4.4, verifica-se pela comparação da argamassa de referência (100C), realizada com a areia normalizada cujas fracções foram juntas no laboratório, com a argamassa constituída por areia normalizada comercial (a que se designou CEN), que a argamassa 100C(CEN) exibe menor teor de ar.

Verifica-se, pela leitura de dados das argamassas 100C e 100C(+SP), que a incorporação de superplastificante conduz à diminuição do teor de ar (Quadro 4.4).

(ii) Observações à família das misturas binárias:

A Figura 4.12 apresenta os valores de teor de ar determinados para as misturas binárias. Segundo a apreciação da representação gráfica observa-se que as argamassas com substituição de cimento por resíduo de FCC possuem maior teor de ar, comparativamente à argamassa de referência - 100C(+SP). A adição de catalisador exausto de FCC, às argamassas cimentícias, promove o aumento da quantidade de ar incorporado, verificando-se um aumento linear ( $R^2=0,93$ ), com o aumento da percentagem de substituição do cimento por este resíduo.

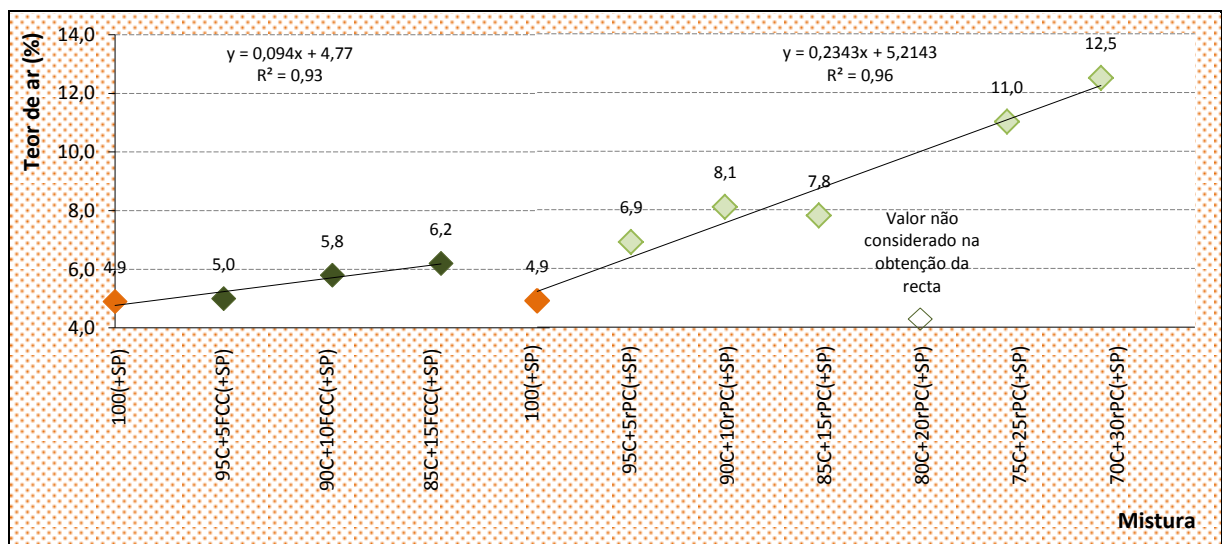


Figura 4.12 - Teor de ar (%) das argamassas da família das misturas binárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC ou de resíduo de pedra natural).

Segundo os dados obtidos, no ensaio de teor de ar (Figura 4.12) efectuado sobre as misturas binárias, verifica-se que as misturas com massa volúmica inferior (Figura 4.9) apresentam maior teor de ar. Isto pode dever-se, ao facto de, as argamassas com menor consistência, alcançarem uma melhor ocupação dos espaços vazios existentes, viabilizando uma melhor ligação da mistura. Por sua vez, uma argamassa mais seca, pode estar associada a maiores espaços vazios entre as partículas, sendo, neste caso, mais difícil obter uma mistura homogénea e facilmente compactável.

Na análise dos dados, presentes na Figura 4.12, referentes às misturas com substituição parcial do cimento por resíduo de pedra natural calcária verifica-se, tendencialmente, um aumento do volume de vazios proporcional ao aumento da percentagem de substituição do cimento por este resíduo. Contudo, a mistura binária com substituição de 20% de cimento corrente por resíduo de pedra

natural calcária apresenta, apenas, 4% de teor de ar. Segundo o traçado da recta de regressão linear, para as outras formulações (excluindo a composição 80C+20rPC(+SP)), obtém-se uma melhor correlação ( $R^2=0,96$ ), evidenciando a necessidade de se efectuarem estudos complementares para verificar o valor (anómalo) de teor de ar para a mistura com substituição de 20% de cimento por resíduo de pedra natural.

Na Figura 4.13 apresenta-se a relação entre o teor de ar e a massa volúmica verificada para a família das misturas binárias. De um modo geral, os resultados adquiridos experimentalmente confirmam o expectável, sendo que, o aumento do volume de vazios deveria reflectir-se na diminuição da massa volúmica. Nas misturas com substituição parcial de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica verifica-se que a massa volúmica, destas misturas, é condicionada pelo teor de ar incorporado, uma vez que se regista uma variação linear entre ambas as propriedades (Figura 4.13).

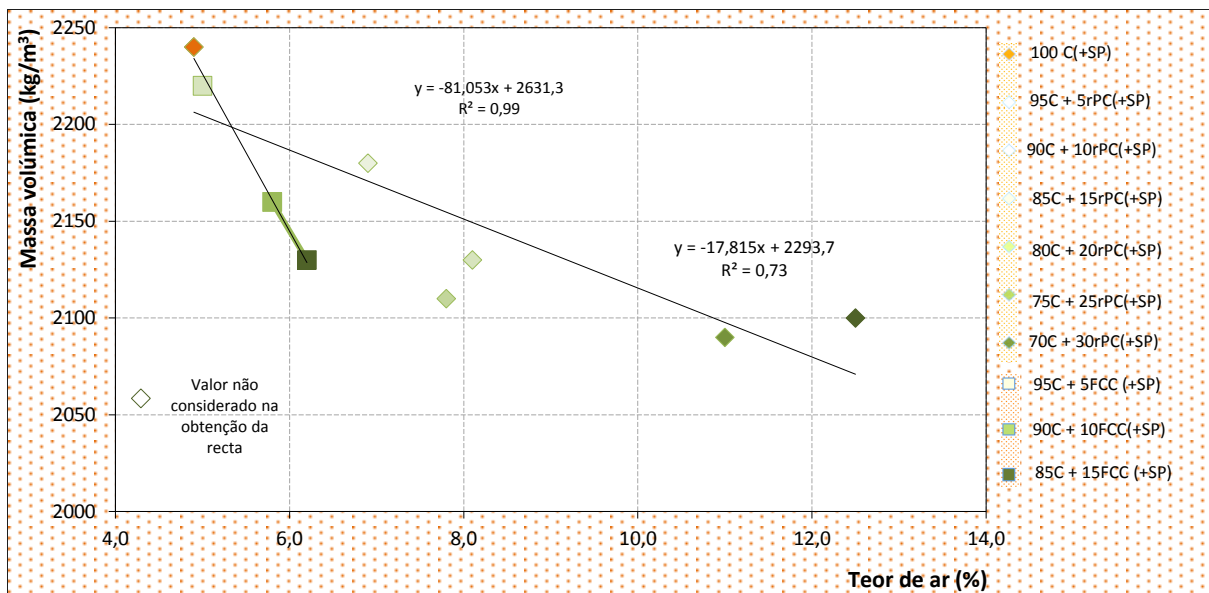


Figura 4.13 - Relação entre o teor de ar (%) e a massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) das argamassas da família das misturas binárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC ou de resíduo de pedra natural).

Na análise da Figura 4.13 e através da exclusão do valor discreto da mistura 80C+20rPC(+SP), pelos motivos enunciados anteriormente, obtém-se, para as misturas binárias com substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária, um coeficiente de correlação de 0,73. Este valor, embora superior ao obtido aquando o traçado da linha de tendência para toda a amostra, não corresponde a uma boa correlação linear, pelo que não se podem tirar conclusões da possível interacção entre as propriedades avaliadas – massa volúmica e teor de ar.

## (iii) Observações à família das misturas ternárias:

Na Figura 4.14 apresenta-se os registos do teor de ar para as misturas ternárias estudadas. Conforme a análise dos resultados obtidos, nas misturas com substituição parcial do cimento por ambos os resíduos industriais, detectam-se pequenas oscilações no teor de ar.

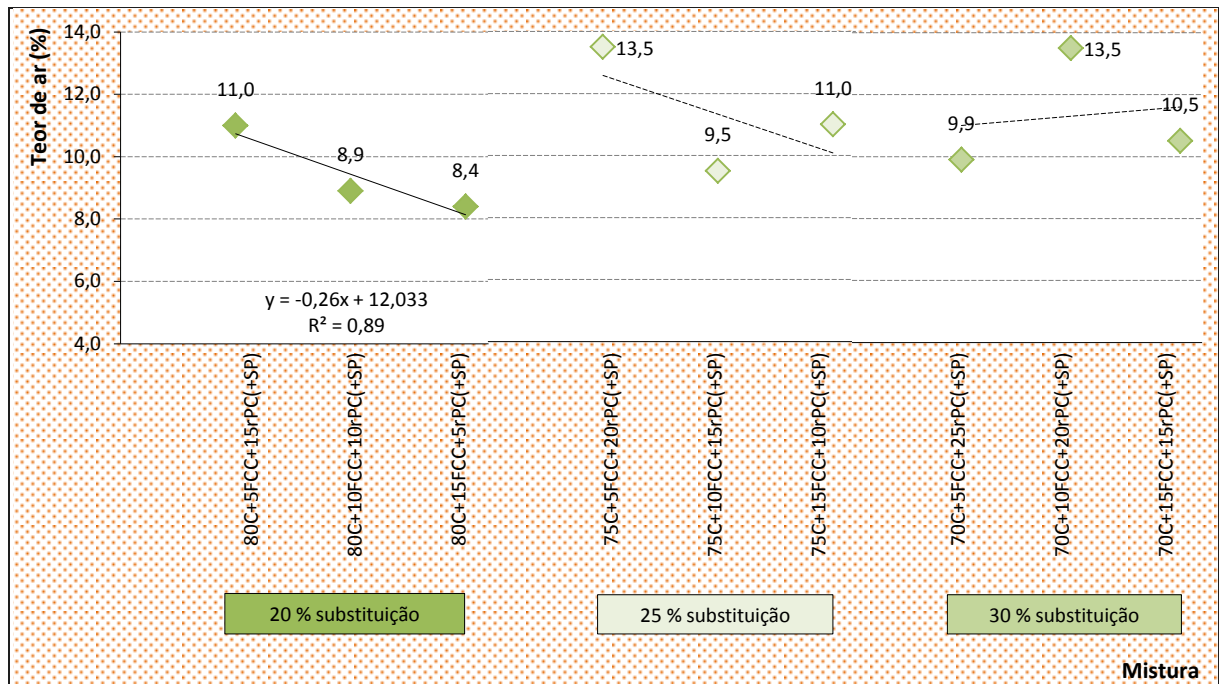


Figura 4.14 - Teor de ar (%) das argamassas da família das misturas ternárias. (A recta representada, e a respectiva expressão da equação, corresponde à correlação linear que se verificou entre o teor de ar em função da incorporação de 20% de resíduos. A tracejado estão representadas as linhas de tendência entre o teor de ar em função da incorporação de 25 e 30% resíduos, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).

As argamassas que apresentam maior teor de ar correspondem às misturas ternárias, cuja incorporação de resíduo de pedra natural é de 20% (misturas 75C+5FCC+20rPC(+SP) e 70C+10FCC+20rPC(+SP)). Relativamente às misturas ternárias com substituição de 20 e 25% de cimento por resíduos industriais observa-se uma diminuição do teor de ar à medida que aumenta a incorporação de resíduo de FCC (e se reduz, consecutivamente, o teor de resíduo de pedra natural). Verifica-se que o resíduo de pedra natural tem um efeito predominante no comportamento destas composições, uma vez que, segundo o observado anteriormente (Figura 4.12), ambos os resíduos contribuem para o aumento do teor de ar (repare-se, no entanto, no valor atípico verificado para a mistura 75C+10FCC+15rPC(+SP));

Nas misturas ternárias com substituição de 30% de cimento por resíduos sólidos industriais, observa-se, tendencialmente, o aumento do teor de ar nas argamassas frescas com o aumento de

incorporação de resíduo de catalisador exausto (Figura 4.14), demonstrando-se, desta forma, o efeito predominante deste resíduo no comportamento das misturas.

A Figura 4.15 apresenta a relação entre o teor de ar e a massa volúmica, bem como, o traçado das linhas de tendência entre ambas as propriedades. De um modo geral, as misturas ternárias revelam massas volúmicas inferiores conforme o aumento do teor de ar.

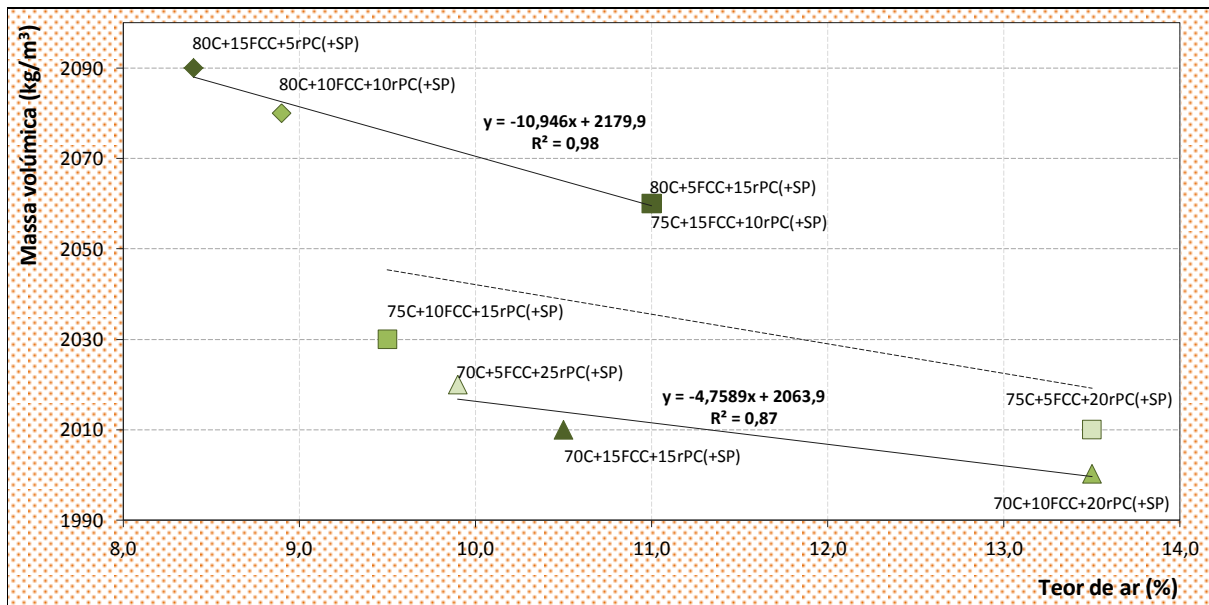


Figura 4.15 - Relação entre o teor de ar (%) e a massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) das argamassas da família das misturas ternárias – estado fresco. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a massa volúmica e o teor de ar em função da percentagem de incorporação de resíduos. A tracejado está representada a linha de tendência entre a massa volúmica e o teor de ar, em função da percentagem de incorporação de resíduos de 25%, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).

### 4.3. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Neste Subcapítulo procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas preparadas (Quadro 3.1) no estado endurecido. A descrição das metodologias de ensaio foi apresentada no Subcapítulo 3.5.

A caracterização no estado endurecido das argamassas diz respeito às características avaliadas aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias de idade. A selecção destas idades de hidratação deve-se ao facto de corresponderem às idades, nas quais se registam variâncias significativas nas propriedades das argamassas.

Ressalva-se que os valores apresentados se obtêm pela média dos valores obtidos em cada ensaio e idade respectiva. Assim, no que se refere à determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, os registos correspondem à média das seis leituras efectuadas (duas por cada provete).

Quanto aos valores de tensão de rotura à flexão apresentados foram obtidos a partir do cálculo da média das três tensões de rotura à flexão (um por cada provete). No que se refere aos registos da tensão de rotura à compressão, estes, correspondem à média dos valores dos seis semi-prismas resultantes do ensaio de flexão. Porém, aos 28 dias, verifica-se a excepção, para todas as misturas, quanto ao número de amostras ensaiadas (N), uma vez que resultam 3 e 4 provetes, respectivamente, da primeira e segunda amassadura. Assim, submeteram-se os 7 provetes ao ensaio de resistência à flexão, e determinou-se a tensão de rotura à compressão, dos 14 semi-prismas resultantes desse ensaio. Após o ensaio de resistência mecânica determinou-se, qual a amostra, de entre as sujeitas a ensaio, que apresentava maior desvio em relação à média das forças de rotura à compressão, tendo-se optado por excluir sempre esse provete (Anexo C.3).

#### 4.3.1. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS

O ensaio de medição da velocidade de propagação das ondas longitudinais de ultra-sons foi realizado, em todos os provetes preparados, ao fim de 2, 7, 28, 54 e 90 dias de hidratação das argamassas (Subsecção 3.5.1.1), apresentando-se, na Figura 4.16, os registos obtidos para todas as misturas estudadas (Quadro 3.1). Uma vez que a quantidade de informação representada, nesta figura, dificulta a sua compreensão e análise, os mesmos registos são apresentados nas Figuras 4.17, 4.18, 4.20 e 4.22.

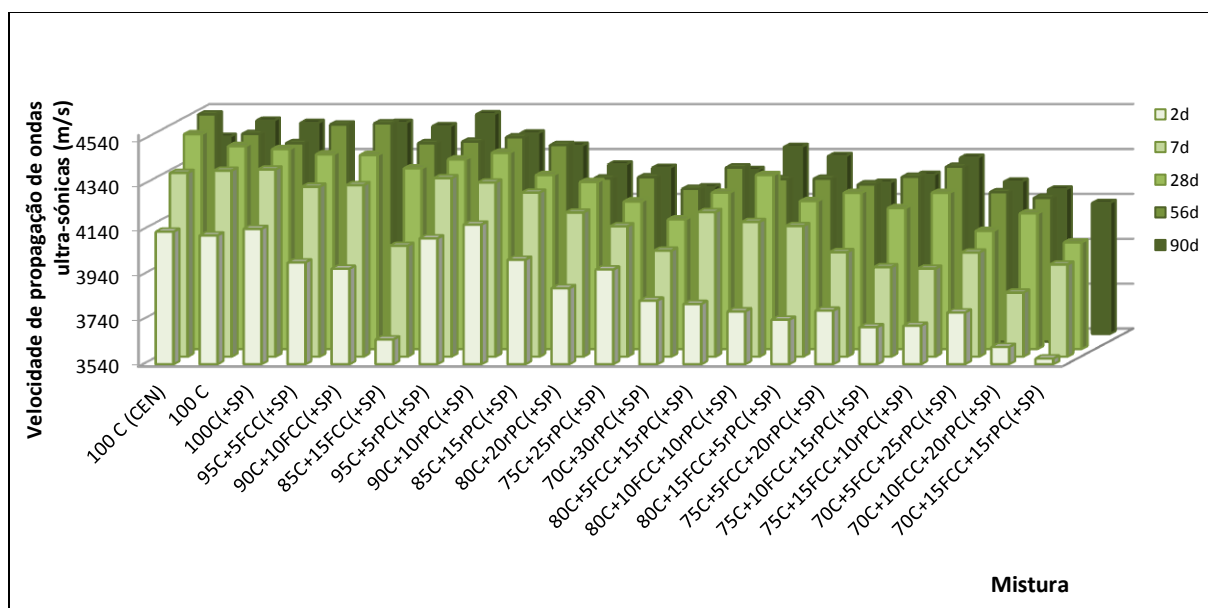


Figura 4.16 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos – estado endurecido.

As ondas longitudinais captadas pelo osciloscópio bem como, os valores médios de velocidade e tempo de propagação de ondas-ultra-sónicas para cada uma das misturas e idade de hidratação (2, 7, 28, 56 e 90 dias) apresentam-se no Anexo D.3.

De um modo geral verifica-se, para todas as misturas, um aumento da velocidade (e consequente diminuição do tempo de propagação de ondas ultra-sónicas) ao longo do tempo. Porém, aos 90 dias de idade, algumas misturas registam uma ténue diminuição da velocidade de propagação – esta diminuição, considerando o desvio associado às determinações da velocidade média, não se revela estatisticamente expressiva. As variações médias (na ordem dos 40m/s) podem ser atribuídas, se recordarmos o facto de que, para além do processo de hidratação do cimento e de endurecimento da argamassa (com um aumento expectável de resistência mecânica), à medida que se progride no tempo a retracção da argamassa evolui, podendo originar fissuras na estrutura interna da argamassa. A presença de vazios e fissuras constituem descontinuidades ao atravessamento da onda no interior da amostra, responsáveis pela redução da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas. Todavia, não se registaram quaisquer fissuras por observação visual das amostras. Estas pequenas oscilações, também, devem ser atribuídas aos limites de erro de determinação experimental, uma vez que, sensivelmente, a partir dos 56 dias, já não se registam variações significativas dos parâmetros avaliados por este ensaio, e, a mínima variação na leitura, repercute-se nestas oscilações aparentes de valor.

Como referido na Subsecção 3.5.1.1, uma das vantagens da utilização deste método não-destrutivo é permitir um acompanhamento do estágio de endurecimento do material e inferir sobre a resistência mecânica apresentada por este. Assim, ao longo do tempo de hidratação, seria esperado, uma densificação da matriz cimentícia, à qual correspondem velocidades de propagação de ondas ultra-sónicas superiores e poderão corresponder a resistências mecânicas mais elevadas. A correlação entre estes ensaios – velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e resistência mecânica (à compressão) – foi testada, e é apresentada no Anexo D.3, para cada mistura, no Anexo D.

(i) Observações à família de referência:

A Figura 4.17 e o Quadro 4.5 apresentam as velocidades médias de propagação de ondas ultra-sónicas, determinadas aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias de idade, para as misturas da família de referência. Comparando a argamassa preparada com a areia normalizada produzida em laboratório, com a argamassa constituída por areia normalizada comercial (CEN), atesta-se que, em geral, a mistura 100C(CEN), conduz a valores de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas superiores. O facto de esta velocidade ser maior, indica que, o material é mais denso, e consequentemente, poderá

apresentar maior valor de resistência (Subsecção 3.5.1.2). Da análise de dados, presentes no Quadro 4.5, constata-se, pela comparação das argamassas 100C e 100C(+SP), que a mistura com superplastificante apresenta maior velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas no estágio inicial (para as primeiras idades) invertendo-se, depois, esta tendência aos 28 dias. Esta observação, no entanto, não se verifica na resistência à compressão, na qual a mistura com superplastificante apresenta, para todas as idades, resistência mecânica à compressão superior (Quadro 4.18).

Em geral (Figura 4.17) as misturas de referência apresentam um incremento do valor da velocidade com a evolução do processo de endurecimento (excepto para a mistura 100C(CEN) aos 90 dias, que apresenta uma ligeira diminuição).

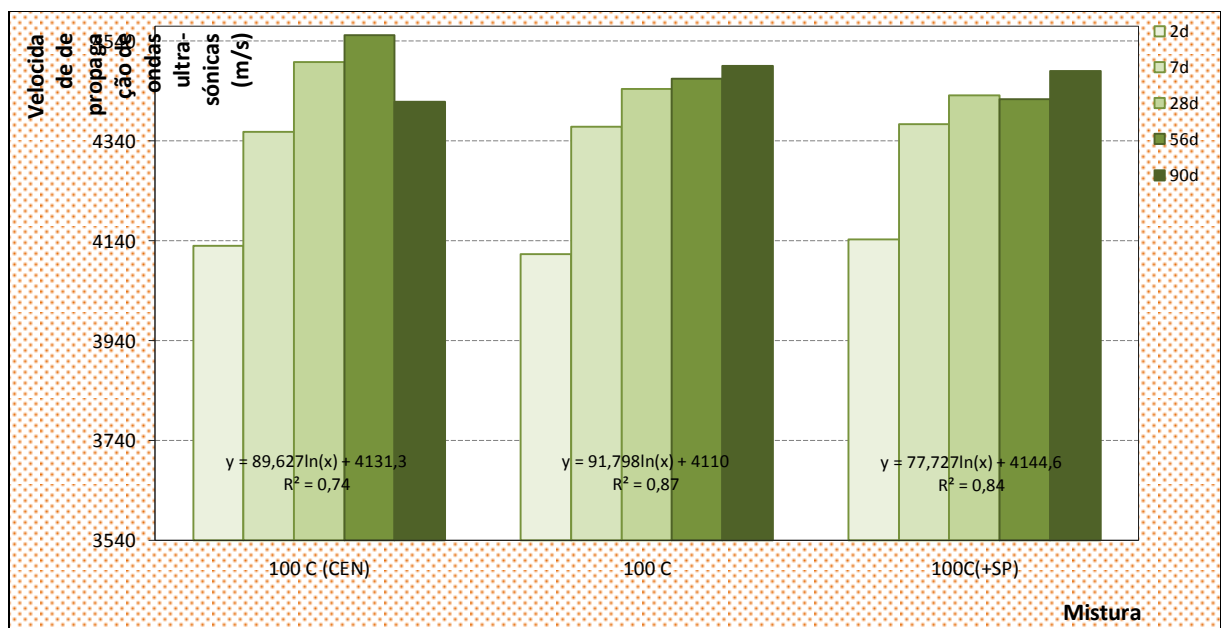


Figura 4.17 - Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos das misturas da família de referência. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função do tempo de hidratação).

Quadro 4.5 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas da família de referência – estado endurecido.

Idade (dias)		2	7	28	56	90				
Mistura	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)				
100C(CEN)	6	4130 ± 15	6	4358 ± 9	12	4498 ± 28	6	4552 ± 11	6	4418 ± 9
100C	6	4113 ± 12	6	4368 ± 27	12	4444 ± 15	6	4465 ± 14	6	4490 ± 25
100C(+SP)	6	4142 ± 16	6	4373 ± 78	12	4431 ± 9	6	4423 ± 10	6	4480 ± 34

N - Número de amostras ensaiadas;

U.S. - Ultra-sons.

(ii) Observações à família das misturas binárias:

Na Figura 4.18 e no Quadro 4.6 representa-se a evolução das velocidades médias de propagação de ondas ultra-sónicas para as misturas com substituição parcial de cimento corrente por catalisador exausto da indústria petroquímica.

Para cada mistura, o valor da velocidade da onda ultra-sónica em função da idade, correlaciona-se a uma equação logarítmica, cujas expressões se apresentam na Figura 4.18, observando-se o incremento logarítmico da velocidade ao longo do processo de endurecimento.

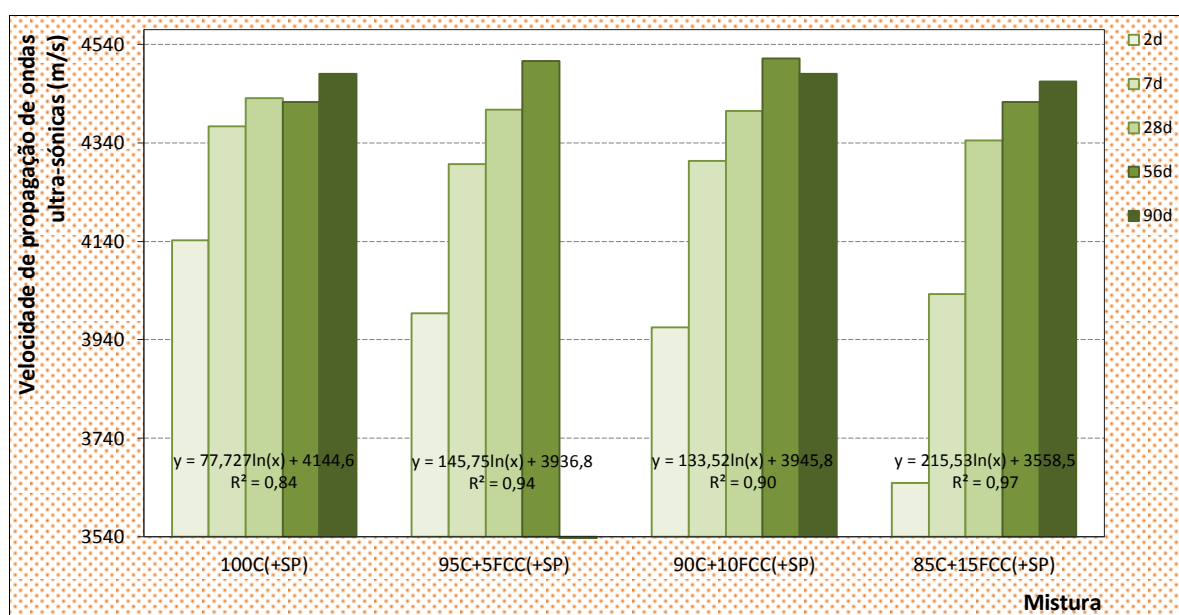


Figura 4.18 - Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função do tempo de hidratação).

Segundo a observação dos registos, as argamassas binárias com substituição de cimento por resíduo de FCC possuem, aos 56 dias de idade, velocidades médias de propagação das ondas ultra-sónicas mais elevadas, comparativamente à argamassa de referência 100C(+SP), indicador de uma matriz cimentícia mais densa.

Observa-se um aumento da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas até à percentagem de incorporação de 10% de resíduo de FCC (Quadro 4.6).

Quadro 4.6 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido.

Idade (dias)	2		7		28		56		90	
	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)
100C(+SP)	6	4142 ± 16	6	4373 ± 78	12	4431 ± 9	6	4423 ± 10	6	4480 ± 34
95C+5FCC(+SP)	6	3993 ± 21	6	4297 ± 5	12	4408 ± 51	6	4507 ± 33	6	-- ± --
90C+10FCC(+SP)	6	3965 ± 5	6	4303 ± 7	12	4405 ± 35	6	4512 ± 26	6	4480 ± 14
85C+15FCC(+SP)	6	3650 ± 0	6	4033 ± 22	12	4345 ± 37	6	4423 ± 27	6	4465 ± 60

N - Número de amostras ensaiadas;

U.S - Ultra-sons.

A Figura 4.19 ilustra a velocidade média de propagação de ondas ultra-sónicas nas argamassas, consoante o aumento da percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC. Segundo a análise da representação gráfica, verifica-se, para todas as idades, uma boa correlação linear entre a velocidade de propagação e o aumento de incorporação de resíduo de FCC. Os resultados adquiridos estão de acordo com o previsto (Secção 2.4.1), uma vez que a incorporação de catalisador exausto de FCC, material rico em alumina e sílica, pode proporcionar a minimização do efeito de diluição, conferindo aos materiais à base de cimento, em última instância, uma resistência mecânica superior. Neste ensaio, o possível incremento de resistência mecânica é detectado, a partir do aumento da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.

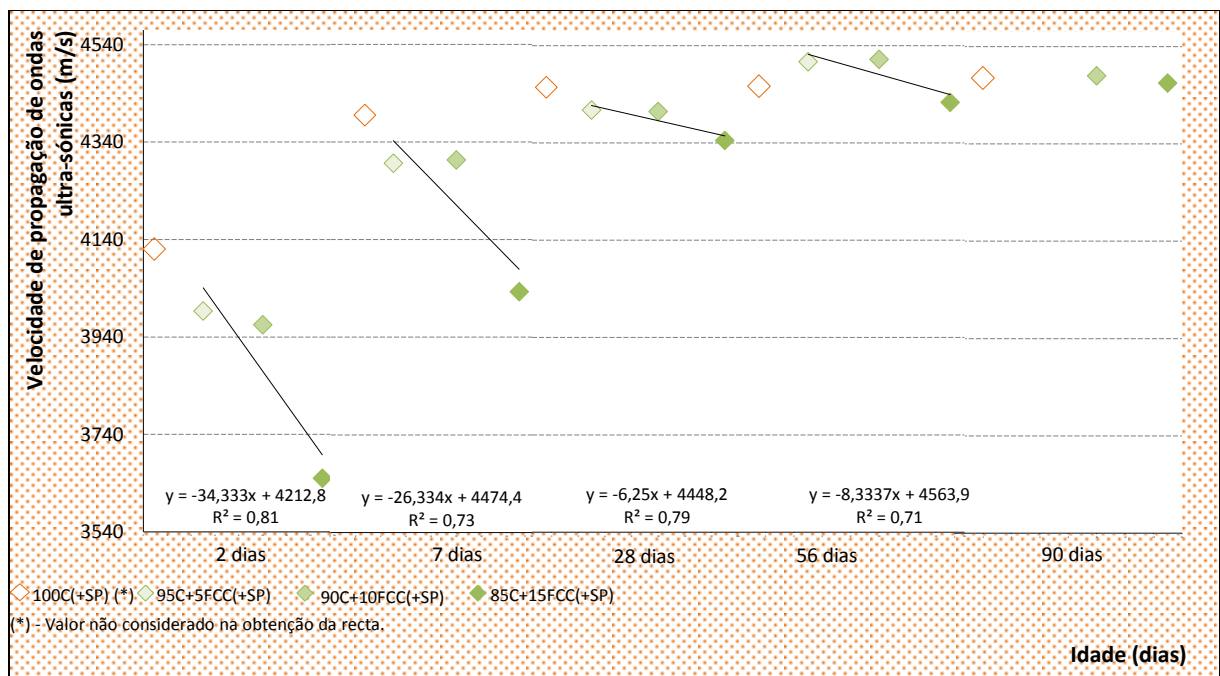


Figura 4.19 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliadas em provetes prismáticas das misturas consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função da percentagem de incorporação de resíduo catalítico de FCC).

Na Figura 4.20 e no Quadro 4.7 apresenta-se a evolução da velocidade média de propagação de ondas ultra-sónicas, para as misturas binárias, nas quais se substituiu o cimento corrente por resíduo de pedra natural calcária.

No global, verifica-se que estas misturas possuem, para todas as idades, velocidades de propagação das ondas ultra-sónicas inferiores comparativamente à argamassa de referência, 100C(+SP).

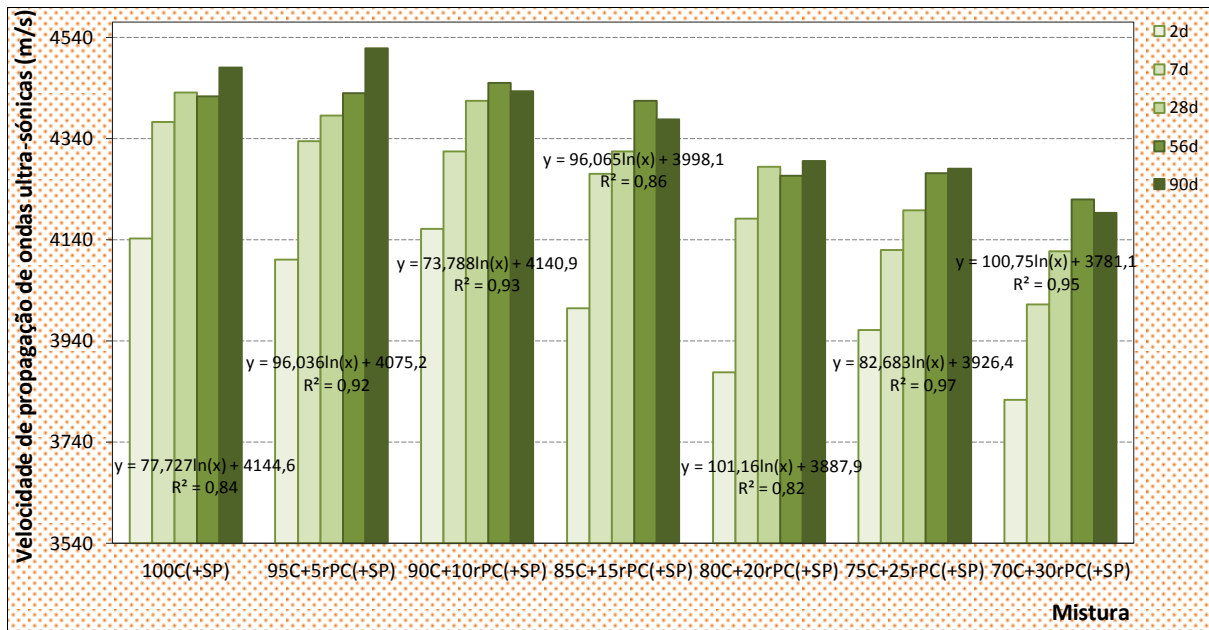


Figura 4.20 - Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função do tempo de hidratação).

Para cada argamassa da família de misturas binárias, com substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária, observa-se um aumento da velocidade ao longo do tempo de hidratação (Figura 4.20), expectável, considerando a densificação da matriz ao longo do tempo. Este aumento, reflecte-se, também, no aumento da resistência mecânica (como se referiu na Subsecção 3.5.1.2) e se apresenta na Secção 4.3.2. Exceptua-se, aos 56 dias, a mistura constituída por 20% de resíduo de pedra natural, e, aos 90 dias de idade, a mistura constituída por 15% que apresentam uma ligeira diminuição.

Quadro 4.7 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por pedra natural calcária (família de misturas binárias) – estado endurecido.

Idade (dias)	2		7		28		56		90	
	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)
100C(+SP)	6	4142 ± 16	6	4373 ± 78	12	4431 ± 9	6	4423 ± 9	6	4480 ± 31
95C+5rPC(+SP)	6	4100 ± 87	6	4335 ± 11	12	4385 ± 19	6	4430 ± 34	6	4518 ± 27
90C+10rPC(+SP)	6	4162 ± 33	6	4315 ± 8	12	4414 ± 34	6	4450 ± 63	6	4433 ± 40
85C+15rPC(+SP)	6	4005 ± 33	6	4270 ± 27	12	4315 ± 18	6	4415 ± 10	6	4378 ± 19
80C+20rPC(+SP)	6	3878 ± 7	6	4182 ± 82	12	4284 ± 13	6	4267 ± 9	6	4295 ± 8
75C+25rPC(+SP)	6	3962 ± 15	6	4120 ± 12	12	4198 ± 15	6	4272 ± 4	6	4280 ± 6
70C+30rPC(+SP)	6	3823 ± 29	6	4012 ± 29	12	4118 ± 22	6	4220 ± 0	6	4193 ± 38

N - Número de amostras ensaiadas;

U.S. – Ultra-sons.

A Figura 4.21 ilustra a velocidade média de propagação de ondas ultra-sónicas nas argamassas conforme o aumento da percentagem de substituição parcial de cimento por resíduo de pedra natural. Segundo a análise desta representação observa-se, para o mesmo tempo de hidratação, à medida que aumenta a percentagem de substituição do cimento por este resíduo, a diminuição da velocidade média de propagação das ondas ultra-sónicas.

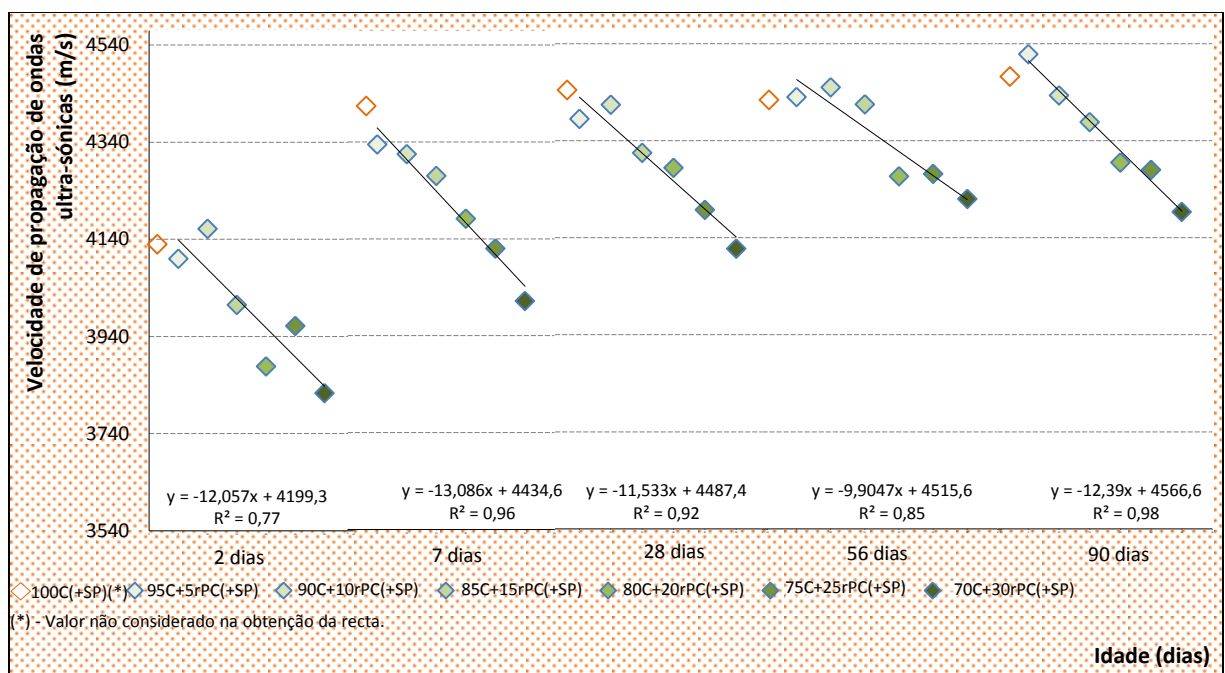


Figura 4.21 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos das misturas consoante teor de substituição de cimento por pedra natural calcária – estado endurecido (família de misturas binárias). (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função da percentagem de incorporação de resíduo de pedra natural).

(iii) Observações à família das misturas ternárias:

Na Figura 4.22 encontram-se representados os registos do Quadro 4.8, bem como, as expressões e coeficiente de correlação das rectas de ajuste logarítmico da velocidade de propagação das ondas, ao longo do tempo, para as diferentes misturas ternárias com incorporação de 20, 25 e 30% de resíduos industriais.

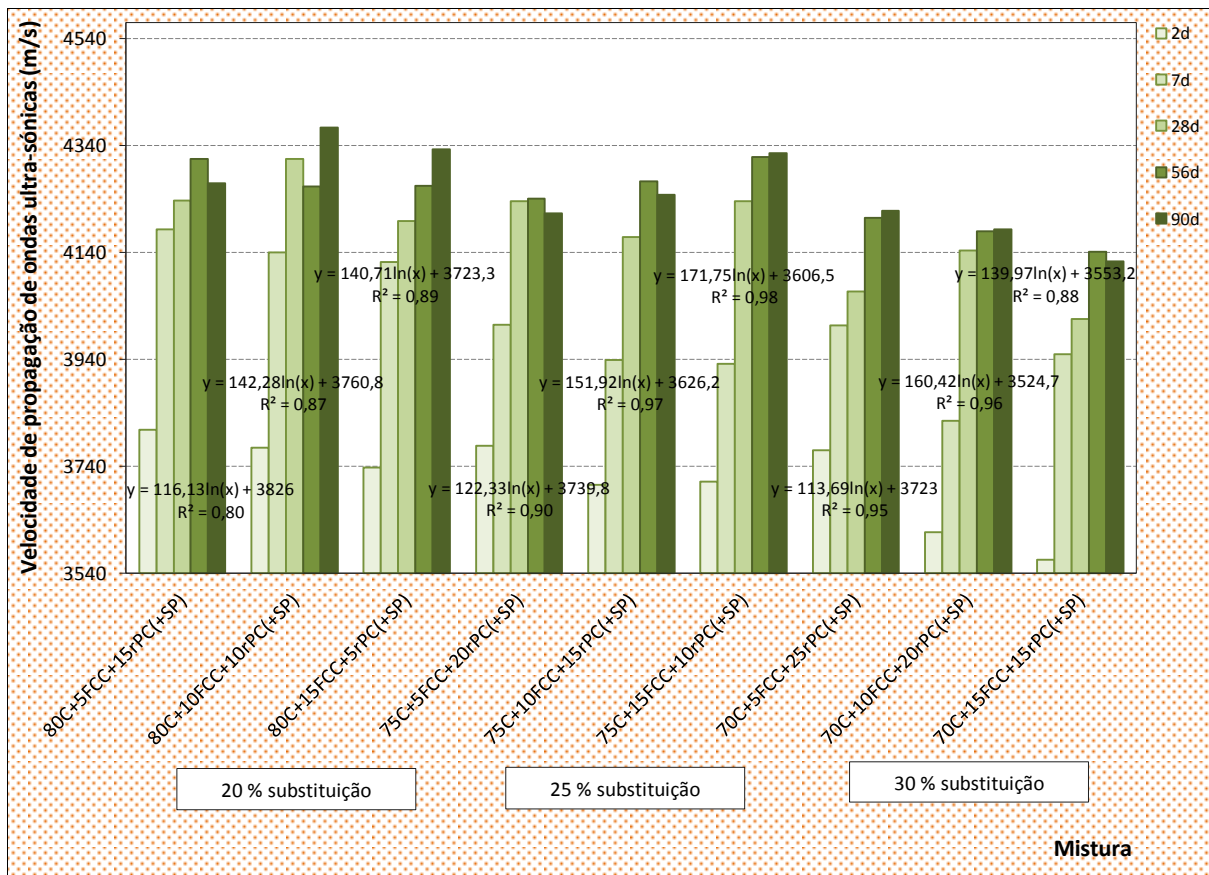


Figura 4.22 - Evolução da velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sónicas avaliada em provetes prismáticos da família das misturas ternárias – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em função do tempo de hidratação).

Mediante a observação dos valores (Figura 4.22) verifica-se, para cada mistura, ao longo do tempo de hidratação um aumento da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas.

Na secção 4.3.2 apresenta-se a análise crítica conjunta dos resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e de resistência mecânica.

**Quadro 4.8 - Velocidade média (m/s) de propagação de ondas ultra-sônicas (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, da família das misturas ternárias – estado endurecido.**

Idade (dias)	2		7		28		56		90	
	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)	N	Velocidade U.S. (m/s)
100C(+SP)	6	4142 ± 16	6	4373 ± 78	12	4431 ± 9	6	4423 ± 9	6	4480 ± 31
80C+5FCC+15rPC(+SP)	6	3808 ± 7	6	4183 ± 7	10	4237 ± 31	6	4315 ± 24	6	4270 ± 17
80C+10FCC+10rPC(+SP)	6	3775 ± 37	6	4140 ± 18	12	4315 ± 19	6	4263 ± 5	6	4373 ± 18
80C+15FCC+5rPC(+SP)	6	3738 ± 20	6	4122 ± 9	12	4199 ± 8	6	4265 ± 25	6	4333 ± 52
75C+5FCC+20rPC(+SP)	6	3778 ± 18	6	4005 ± 30	12	4236 ± 68	6	4240 ± 23	6	4213 ± 29
75C+10FCC+15rPC(+SP)	6	3705 ± 5	6	3938 ± 25	12	4168 ± 19	6	4273 ± 5	6	4248 ± 35
75C+15FCC+10rPC(+SP)	6	3712 ± 7	6	3932 ± 27	12	4236 ± 39	6	4318 ± 11	6	4325 ± 19
70C+5FCC+25rPC(+SP)	6	3770 ± 6	6	4003 ± 12	12	4067 ± 28	6	4205 ± 8	6	4218 ± 16
70C+10FCC+20rPC(+SP)	6	3617 ± 5	6	3825 ± 62	12	4144 ± 19	6	4180 ± 18	6	4183 ± 5
70C+15FCC+15rPC(+SP)	6	3565 ± 19	6	3950 ± 8	12	4015 ± 34	6	4142 ± 12	6	4123 ± 9

N - número de provetes ensaiados.

#### 4.3.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO E À COMPRESSÃO

A resistência mecânica da argamassa, no estado endurecido, diz respeito à capacidade de suportar os esforços mecânicos que sobre ela actuam.

A caracterização das argamassas incluiu os ensaios, frequentemente, utilizados para a caracterização da resistência à flexão e compressão em provetes prismáticos, previstas pela norma NP EN 196-1 [69].

No Quadro 4.9 apresentam-se as correlações lineares, verificadas entre o ensaio de resistência mecânica à flexão e à compressão, recorrendo a prensa. Segundo a análise dos dados, presentes no Quadro 4.9 e respectivas representação apresentadas no Anexo D.3, é evidente a correlação entre ambas as propriedades de resistência, ao longo do período de ensaio.

**Quadro 4.9 - Relação entre as resistências mecânicas (MPa) – flexão e compressão – avaliadas ao longo do tempo de hidratação.**

Família	Mistura	R <sup>2</sup>	Família	Mistura	R <sup>2</sup>	Família	Mistura	R <sup>2</sup>
				95C+5FCC(+SP)	1,0		80C+5FCC+15rPC(+SP)	1,0
				90C+10FCC(+SP)	1,0		80C+10FCC+10rPC(+SP)	0,9
				85C+15FCC(+SP)	1,0		80C+15FCC+5rPC(+SP)	1,0
	100C(CEN)	1,0		95C+5rPC(+SP)	0,9		75C+5FCC+20rPC(+SP)	1,0
<b>Referência</b>	100C	0,9	<b>Misturas binárias</b>	90C+10rPC(+SP)	1,0	<b>Misturas ternárias</b>	75C+10FCC+15rPC(+SP)	1,0
	100C(+SP)	0,9		85C+15rPC(+SP)	1,0		75C+15FCC+10rPC(+SP)	1,0
				80C+20rPC(+SP)	1,0		70C+5FCC+25rPC(+SP)	1,0
				75C+25rPC(+SP)	1,0		70C+10FCC+20rPC(+SP)	1,0
				70C+30rPC(+SP)	1,0		70C+15FCC+15rPC(+SP)	0,9

R<sup>2</sup> - Factor de correlação linear.

Com o intuito de facilitar a análise crítica e a discussão dos resultados, em relação ao efeito da incorporação dos resíduos, em estudo, nas propriedades mecânicas das argamassas preparadas, determinou-se, para cada formulação, o “índice de actividade”, baseado no cálculo do índice de actividade pozolânica proposto pela norma ASTM C311-07 [83]. De acordo com esta norma o “índice de actividade pozolânica<sup>6</sup>” determina-se, como sendo a razão entre o valor da resistência à compressão da argamassa com 20% de adição de pozolana, aos 28 dias de idade, e o valor da resistência à compressão da argamassa de referência (sem incorporação de pozolana).

Neste trabalho, considerou-se “índice de actividade” (IA) como a relação entre a resistência da argamassa produzida para uma dada mistura de cimento e de cimento com resíduo(s), com uma determinada idade, e a resistência da argamassa de referência (sem substituição de cimento por resíduo(s) e com incorporação de superplastificante) ensaiadas para a mesma idade, sob as mesmas condições, ou seja, adoptou-se a seguinte expressão de cálculo:

$$\text{Índice de actividade (IA)} = \frac{A}{B} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

sendo,

A - valor médio da resistência mecânica (à flexão ou à compressão) da argamassa produzida com uma dada mistura (Quadro 3.1);

B - valor médio da resistência mecânica (à flexão ou à compressão) da argamassa de referência – 100C(+SP) - com a mesma idade.

#### ❖ **Resistência à flexão**

Na Figura 4.23 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência mecânica à flexão das argamassas, preparadas neste trabalho (Quadro 3.1), com diferentes tempos de hidratação (2, 7, 28, 56 e 90 dias). Uma vez que, a quantidade de informação representada nesta figura dificulta a análise dos resultados, os mesmos serão apresentados nas Figuras 4.24, 4.25, 4.28 e 4.29.

No Anexo D.3, expõe-se os gráficos que relacionam à flexão, para as diferentes idades, correspondentes a cada mistura.

<sup>6</sup> Na norma ASTM C311 este índice de actividade pozolânica denomina-se por “Strength Activity Index” (SAI).

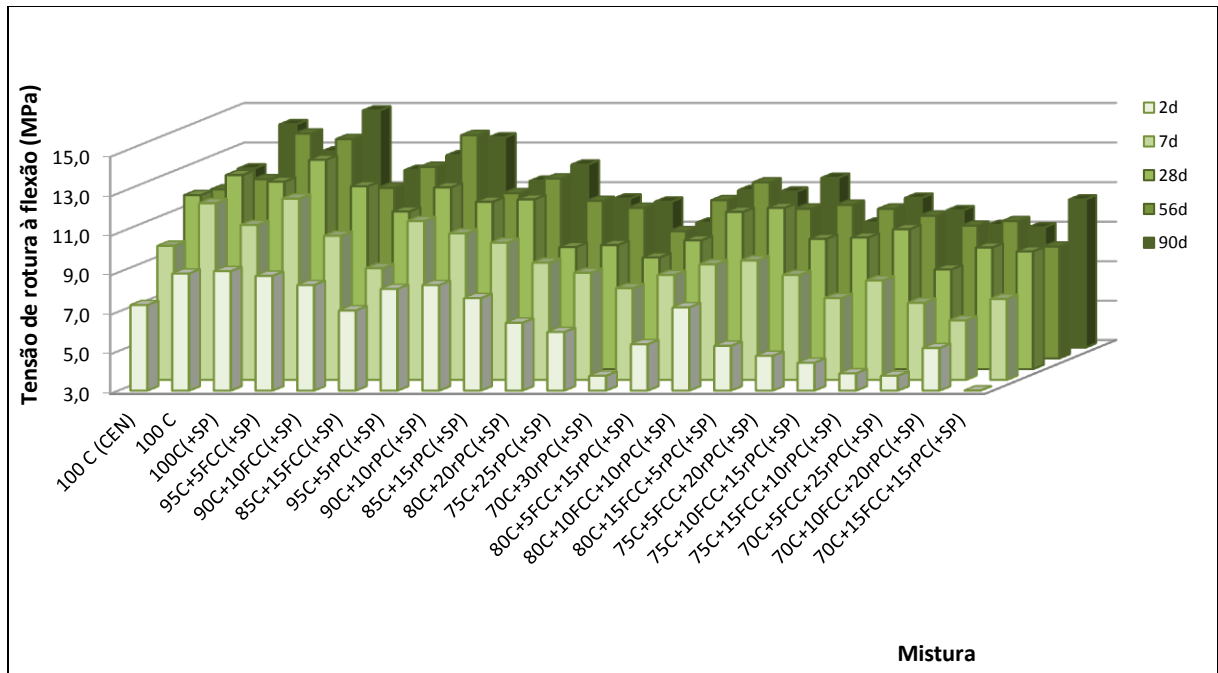


Figura 4.23 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos – estado endurecido.

(i) Observações à família de misturas de referência:

Na Figura 4.24 e no Quadro 4.10 apresentam-se os valores médios de tensão de rotura à flexão, para as diferentes idades de hidratação testadas, da família de misturas de referência.

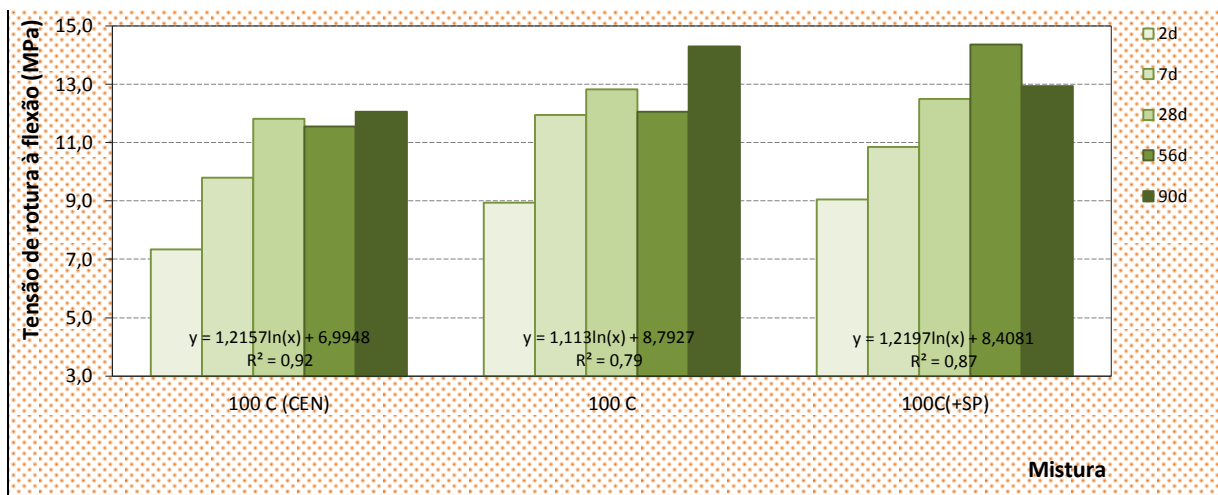


Figura 4.24 - Evolução da tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas da família de referência – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação).

**Quadro 4.10 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas da família de referência – estado endurecido.**

Idade (dias)	2		7		28		56		90	
	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)
100C(CEN)	3	7,3 ± 1,2	3	9,8 ± 0,4	6	11,8 ± 1,0	3	11,6 ± 0,1	3	12,1 ± 0,4
100C	3	8,9 ± 0,4	3	12,0 ± 1,0	6	12,8 ± 1,3	3	12,1 ± 0,3	3	14,3 ± 0,4
100C(+SP)	3	9,1 ± 0,6	3	10,9 ± 0,6	6	12,5 ± 0,9	3	14,4 ± 0,4	3	12,9 ± 0,5

N - Número de amostras ensaiadas.

Pela comparação das resistências das argamassas de referência normalizadas com areia produzida em laboratório e com a areia comercial, verifica-se que a mistura 100C(CEN) apresenta menor resistência à flexão. Em ambos os casos (misturas 100C e 100C(CEN)), a resistência à flexão aumenta até aos 28 dias, mantendo-se praticamente constante a partir dessa idade de hidratação.

Note-se que, a existência de valores médios de resistência inferiores à medida que o tempo de hidratação decorre, podem atribuir-se aos limites de erro de determinação experimental, uma vez que, como a tensão de rotura à flexão já não apresenta oscilações significativas (particularmente a partir dos 56 dias), a mínima variação na leitura conduz a estas oscilações aparentes do valor. Por outro lado, a amostra pode não ser estatisticamente representativa para a variabilidade que os materiais à base de cimento apresentam.

Observa-se que a mistura de referência com superplastificante, 100C(+SP), ostenta, para idades avançadas, resistências à flexão superiores comparativamente à mistura 100C. Repare-se, contudo, no resultado atípico, atendendo à descrição do produto (Anexo B), obtido para a mistura 100C(+SP) aos 90 dias (Quadro 4.10).

**Quadro 4.11 - Índice de actividade<sup>7</sup> (IA), da família de referência, com base na resistência à flexão.**

Mistura	IA (%)				
	2d	7d	28d	56d	90d
100C(CEN)	81,0	90,3	94,6	80,4	93,4
100C	98,7	110,1	102,7	84,0	110,6
<b>100C(+SP)</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

d - dias.

<sup>7</sup> Recorde-se que, no presente estudo, o “índice de actividade” foi calculado conforme a equação 3.4. Neste caso (Quadro 4.11) corresponde à razão entre os valores médios de resistência à flexão de provetes de argamassa preparados com areia normalizada comercial e misturada em laboratório e a mistura 100C(+SP), para a mesma idade e sobre as mesmas condições.

(ii) Observações à família das misturas binárias:

A Figura 4.25 e o Quadro 4.12 apresentam os valores médios de resistência à flexão, obtida ao longo do tempo de hidratação, nas argamassas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC

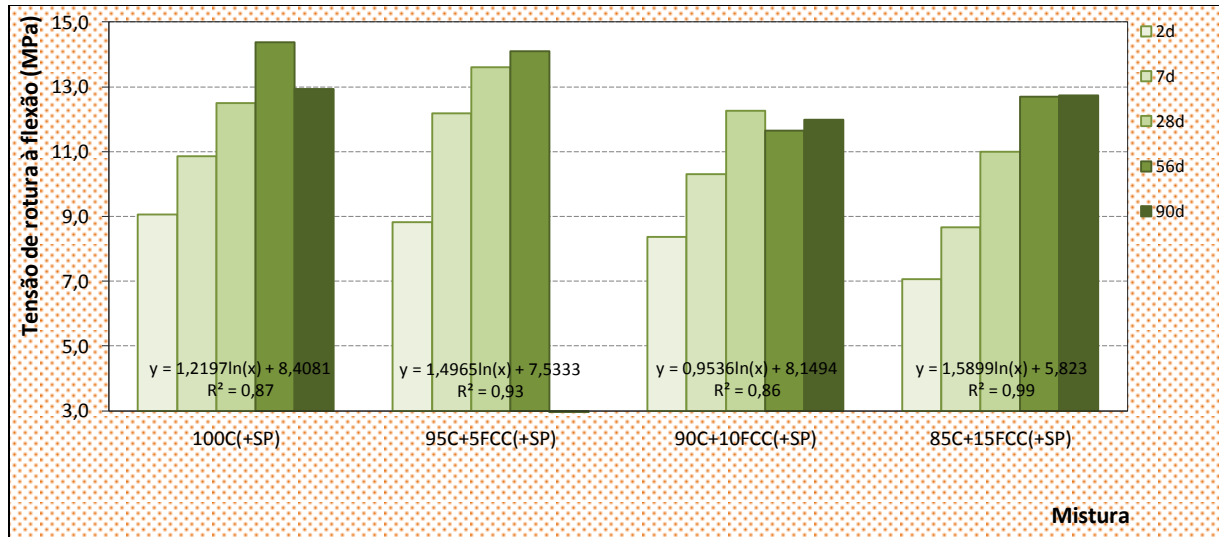


Figura 4.25 - Evolução da tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação).

Quadro 4.12 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido.

Mistura	Idade (dias) 2		7		28		56		90	
	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)
100C(+SP)	3	9,1 ± 0,6	3	10,9 ± 0,6	6	12,5 ± 0,9	3	14,4 ± 0,4	3	12,9 ± 0,5
95C+5FCC(+SP)	3	8,8 ± 0,5	3	12,2 ± 0,4	6	13,6 ± 1,1	3	14,1 ± 0,7	3	15,0 ± 0,5
90C+10FCC(+SP)	3	8,4 ± 0,1	3	10,3 ± 0,7	6	12,3 ± 1,2	3	11,6 ± 0,8	3	12,0 ± 0,9
85C+15FCC(+SP)	3	7,1 ± 0,7	3	8,7 ± 0,4	6	11,0 ± 0,7	3	12,7 ± 1,3	3	12,7 ± 0,4

N - Número de amostras ensaiadas.

Na Figura 4.25 observa-se uma tendência de aumento da tensão de rotura à flexão, à medida que aumenta a idade de hidratação das argamassas, para cada mistura. Nesta representação apresentam-se, ainda, as expressões das rectas de ajuste logarítmico da tensão de rotura à flexão em função do tempo de hidratação.

Quadro 4.13 - Índice de actividade<sup>8</sup> (IA), das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias), com base na resistência à flexão.

Mistura	IA (%)				
	2d	7d	28d	56d	90d
100C(+SP)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
95C+5FCC(+SP)	97,4	112,2	108,9	98,1	116,3
90C+10FCC(+SP)	92,2	95,0	98,2	81,0	92,7
85C+15FCC(+SP)	78,0	79,9	88,0	88,3	98,5

d - dias.

Da análise desta (Figura 4.25) observa-se que a argamassa, pertencente à família das misturas binárias, com substituição de cimento por 5% de resíduo de FCC ostenta, aos 2 dias de hidratação, resistência à flexão inferior relativamente à mistura de referência (100C(+SP)). Porém, a partir dos 7 dias de hidratação, observa-se uma recuperação da resistência à flexão.

Nas argamassas com 10 e 15% de substituição de cimento por este resíduo, os valores de resistência à flexão, relativamente à da argamassa sem substituição, são recuperados a partir dos 28 e aos 90 dias, respectivamente (Figura 4.26). Esta observação está, também, evidenciada no Quadro 4.13, no qual se apresentam os valores dos índices de actividade destas misturas com base nos valores de resistência à flexão.

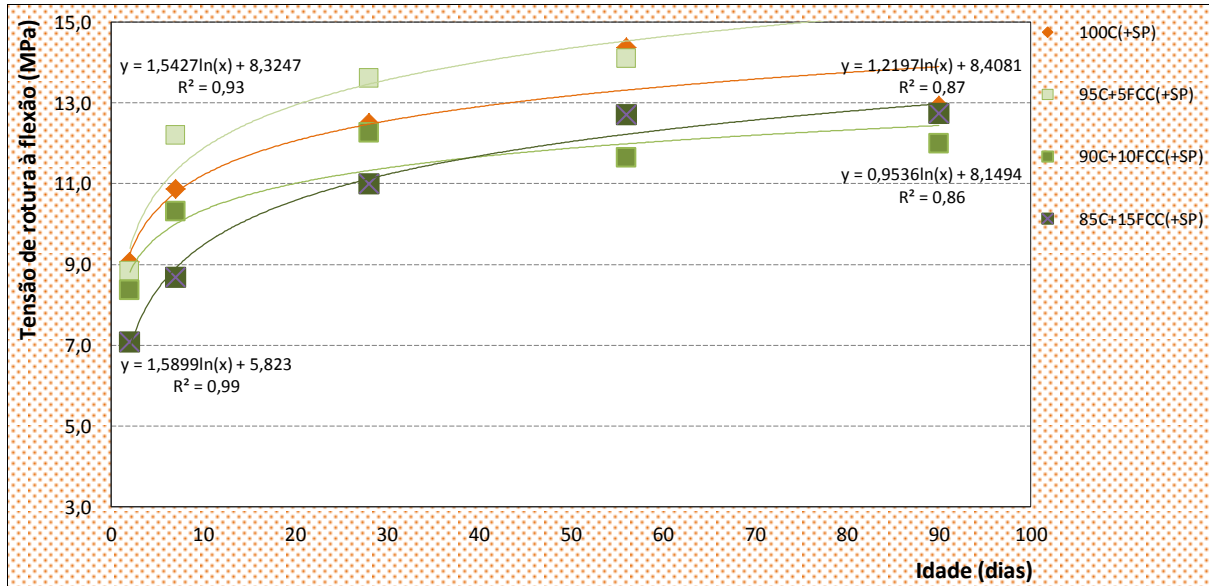
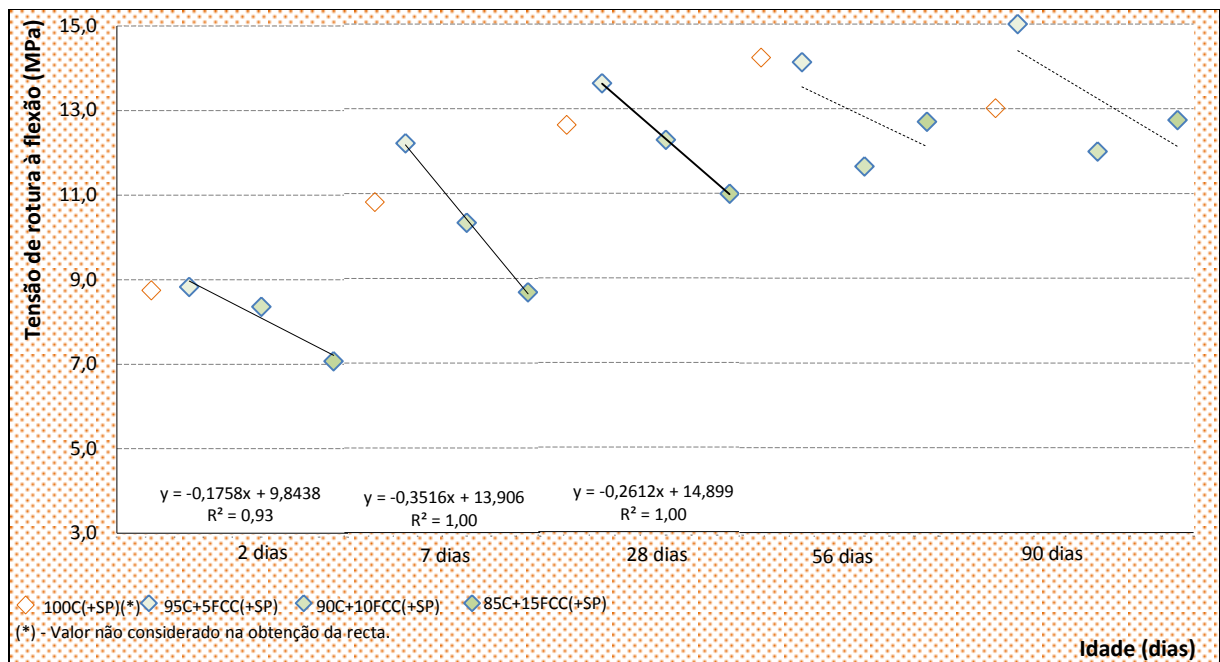


Figura 4.26 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas apresentadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação).

<sup>8</sup> Atenda-se que, no presente estudo, o “índice de actividade” foi calculado conforme a equação 3.4. Neste caso (Quadro 4.13), corresponde à razão entre os valores médios de resistência à flexão de provetes de argamassa preparados com uma dada substituição de cimento por resíduo de FCC e a mistura 100C(+SP), para a mesma idade sob as mesmas condições.

Na Figura 4.27 estão representados os valores médios de tensão de rotura à flexão das misturas com 5, 10 e 15% de incorporação de resíduo de FCC para as diferentes idades. Da análise da figura verifica-se que, tipicamente, maiores percentagens de incorporação de resíduo se reflectem na diminuição da tensão de rotura à flexão para a mesma idade de cura. Esta diminuição, à medida que aumenta a percentagem de substituição de cimento, é evidenciada pelas rectas de ajuste linear e correlações entre a resistência à flexão em função da percentagem de incorporação representadas na mesma figura.



**Figura 4.27 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a resistência à flexão em função da percentagem de incorporação de resíduo de FCC. A tracejado está representada a linha de tendência entre a resistência à flexão, em função da percentagem de incorporação de resíduos, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).**

Na Figura 4.28 e no Quadro 4.10 ilustram-se os valores médios de tensão de rotura à flexão, para as diferentes idades de hidratação testadas, das misturas binárias com substituição parcial de cimento por resíduo de pedra natural calcária. As argamassas com incorporação de resíduo de pedra natural, de natureza calcária, possuem valores de resistência à flexão inferiores comparativamente à mistura de referência, 100C(+SP), excepto para a argamassa com substituição parcial de 5% de cimento por resíduo de pedra natural, na qual não se verifica reflexos significativos na tensão de rotura à flexão.

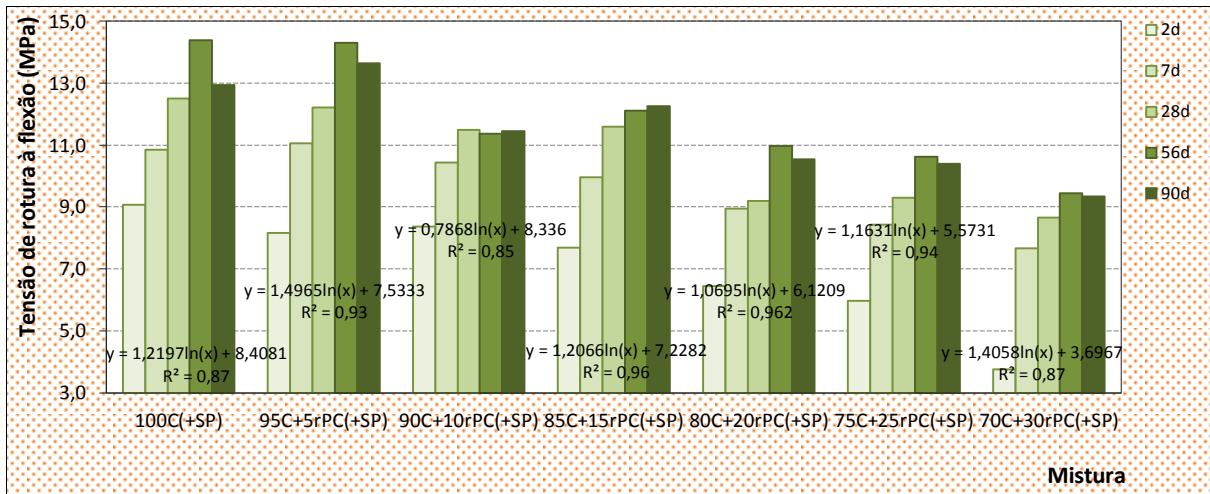


Figura 4.28 - Evolução da tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação).

Quadro 4.14 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média±desvio padrão) avaliada em provetes prismáticos com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido.

Idade (dias)	2	7	28	56	90					
Mistura	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)
100C(+SP)	3	9,1 ± 0,6	3	10,9 ± 0,6	6	12,5 ± 0,9	3	14,4 ± 0,4	3	12,9 ± 0,5
95C+5rPC(+SP)	3	8,2 ± 0,1	3	11,1 ± 0,9	6	12,2 ± 1,1	3	14,3 ± 0,3	3	13,6 ± 0,4
90C+10rPC(+SP)	3	8,4 ± 0,1	3	10,4 ± 0,7	6	11,5 ± 1,1	3	11,4 ± 0,7	3	11,4 ± 0,5
85C+15rPC(+SP)	3	7,7 ± 0,1	3	10,0 ± 0,3	6	11,6 ± 1,1	3	12,1 ± 0,6	3	12,3 ± 0,6
80C+20rPC(+SP)	3	6,4 ± 0,0	3	8,9 ± 0,1	6	9,2 ± 0,7	3	11,0 ± 0,5	3	10,5 ± 0,2
75C+25rPC(+SP)	3	6,0 ± 0,6	3	8,4 ± 0,5	6	9,3 ± 0,6	3	10,6 ± 0,8	3	10,4 ± 1,4
70C+30rPC(+SP)	3	3,8 ± 0,2	3	7,7 ± 0,3	6	8,7 ± 0,4	3	9,5 ± 0,7	3	9,3 ± 0,6

N - Número de amostras ensaiadas.

No Quadro 4.15 apresenta-se o IA das misturas com substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária, relativamente à mistura de referência – 100C(+SP). Da análise destes valores verifica-se, nas misturas com incorporação de 10 e 15% de resíduo de pedra natural, a perda de resistência à flexão inferior à percentagem de substituição de cimento por resíduo.

Observa-se (Quadro 4.15), ainda, que as misturas binárias com incorporação de 20 e 25% de resíduo de pedra natural, considerando o efeito de diluição, recuperam a resistência à flexão, ao fim de 7 dias.

Quadro 4.15 - Índice de actividade<sup>9</sup> (IA), das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias), com base na resistência à flexão.

Mistura	IA (%)				
	2d	7d	28d	56d	90d
100C(+SP)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
95C+5rPC(+SP)	90,1	101,8	97,7	99,5	105,4
90C+10rPC(+SP)	92,2	96,0	91,9	79,1	88,5
85C+15rPC(+SP)	84,9	91,7	92,8	84,2	94,9
80C+20rPC(+SP)	71,1	82,4	73,6	76,4	81,6
75C+25rPC(+SP)	65,9	77,7	74,4	73,9	80,4
70C+30rPC(+SP)	41,4	70,5	69,4	65,8	72,2

d - dias.

A Figura 4.29 representa a tensão de rotura à flexão média, consoante o aumento da percentagem de substituição de cimento por resíduo de pedra natural, para as diferentes idades de hidratação. Constata-se, pela observação de dados presentes na representação gráfica, que o aumento da percentagem de substituição de cimento por resíduo de pedra natural (até 30%) traduz-se, linearmente, para todas as idades, no decréscimo da tensão de rotura à flexão.

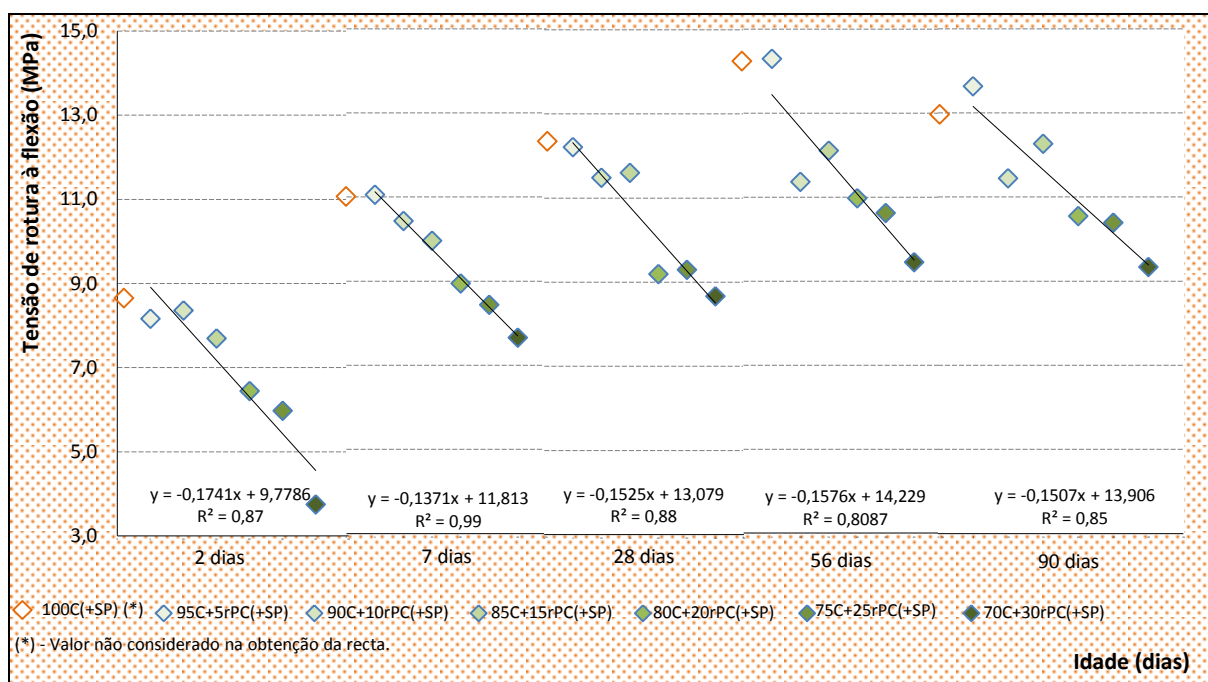


Figura 4.29 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticas das misturas, consoante teor de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a resistência à flexão em função da percentagem de incorporação de resíduo de pedra natural).

<sup>9</sup> Note-se que, no presente estudo, o “índice de actividade” foi calculado conforme a equação 3.4. No caso (Quadro 4.15), corresponde à razão entre os valores médios de resistência à flexão de provetes de argamassa preparados com uma dada substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária e a mistura 100C(+SP), para a mesma idade sob as mesmas condições.

(iii) Observações à família das misturas ternárias:

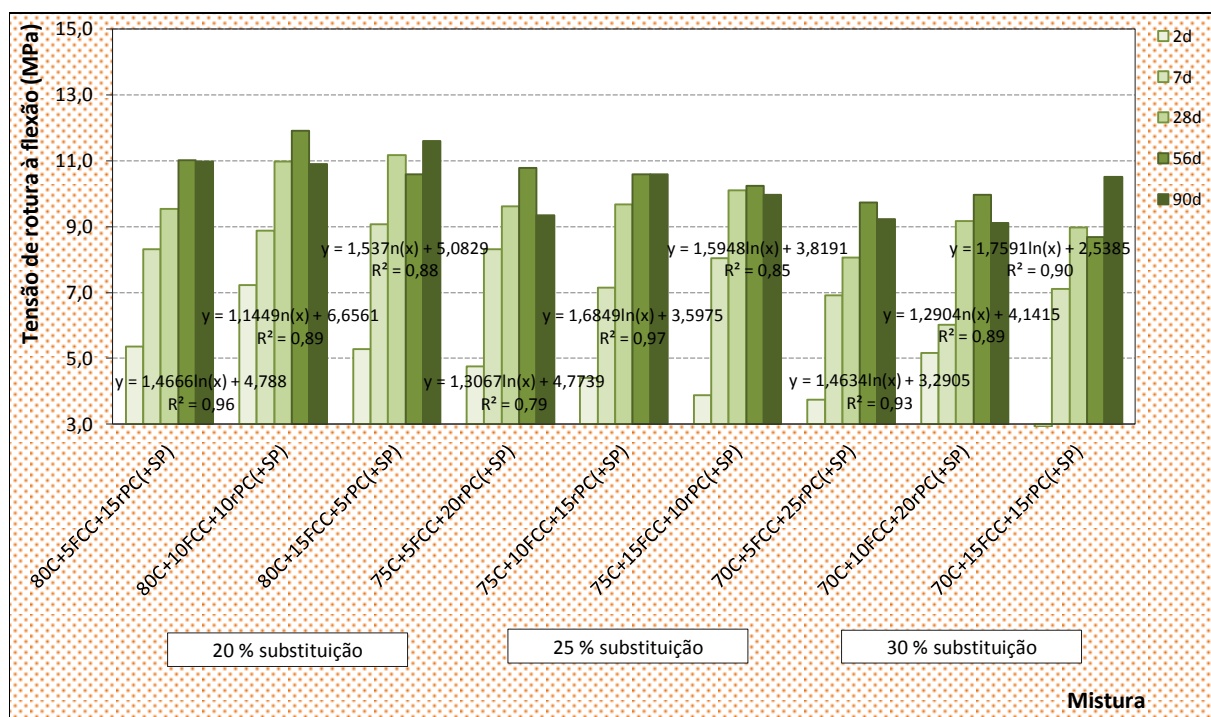


Figura 4.30 - Evolução da tensão média de rotura à flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos da família das misturas ternárias. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a tensão de rotura à flexão em função do tempo de hidratação).

Quadro 4.16 - Tensão média de rotura à flexão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, da família das misturas ternárias.

Idade (dias)	2	7	28	56	90					
Mistura	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)	N	Tensão de rotura à flexão (MPa)
100C(+SP)	3	9,1 ± 0,6	3	10,9 ± 0,6	6	12,5 ± 0,9	3	14,4 ± 0,4	3	12,9 ± 0,5
80C+5FCC+15rPC(+SP)	3	5,4 ± 0,2	3	8,3 ± 0,3	6	9,5 ± 3,4	3	11,0 ± 0,2	3	11,0 ± 0,4
80C+10FCC+10rPC(+SP)	3	7,2 ± 0,1	3	8,9 ± 0,4	6	11,0 ± 0,6	3	11,9 ± 0,8	3	10,9 ± 0,2
80C+15FCC+5rPC(+SP)	3	5,3 ± 0,2	3	9,1 ± 0,6	6	11,2 ± 0,9	3	10,6 ± 0,7	3	11,6 ± 0,7
75C+5FCC+20rPC(+SP)	3	4,8 ± 0,1	3	8,3 ± 0,4	6	9,6 ± 0,4	3	10,8 ± 0,3	3	9,3 ± 0,9
75C+10FCC+15rPC(+SP)	3	4,4 ± 0,2	3	7,1 ± 0,2	6	9,7 ± 0,6	3	10,6 ± 0,5	3	10,6 ± 0,3
75C+15FCC+10rPC(+SP)	3	3,9 ± 0,1	3	8,0 ± 0,7	6	10,1 ± 0,5	3	10,2 ± 0,5	3	10,0 ± 0,3
70C+5FCC+25rPC(+SP)	3	6,9 ± 0,2	3	8,1 ± 0,1	6	9,7 ± 0,4	3	9,7 ± 0,4	3	9,2 ± 0,1
70C+10FCC+20rPC(+SP)	3	6,0 ± 2,2	3	9,2 ± 0,3	6	10,0 ± 0,4	3	10,0 ± 0,4	3	9,1 ± 0,8
70C+15FCC+15rPC(+SP)	3	7,1 ± 0,3	3	9,0 ± 0,6	6	8,7 ± 0,6	3	8,7 ± 0,3	3	10,5 ± 0,8

N - Número de amostras ensaiadas.

Na Figura 4.30 encontram-se representados os valores do Quadro 4.16 e as expressões e coeficiente de correlação das rectas de ajuste logarítmico das tensões médias de resistência à flexão, ao longo do tempo, para as diferentes misturas ternárias com incorporação de 20, 25 e 30% de resíduos industriais.

Quadro 4.17 - Índice de actividade<sup>10</sup> (IA), da família das misturas ternárias, com base na resistência à flexão.

Mistura	IA (%)				
	2d	7d	28d	56d	90d
100C(+SP)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
80C+5FCC+15rPC(+SP)	59,1	76,6	76,3	76,6	84,9
80C+10FCC+10rPC(+SP)	79,7	81,7	87,8	82,9	84,3
80C+15FCC+5rPC(+SP)	58,2	83,5	89,4	73,6	89,7
75C+5FCC+20rPC(+SP)	52,6	76,6	76,9	75,0	72,2
75C+10FCC+15rPC(+SP)	48,7	65,8	77,5	73,6	81,9
75C+15FCC+10rPC(+SP)	42,8	74,1	80,8	71,2	77,0
70C+5FCC+25rPC(+SP)	41,4	63,7	64,5	67,7	71,3
70C+10FCC+20rPC(+SP)	56,9	55,4	73,4	69,3	70,4
70C+15FCC+15rPC(+SP)	32,3	65,5	71,8	60,3	81,3

d - dias.

No Quadro 4.17, referente ao índice de actividade das misturas ternárias em relação à mistura de referência (100C(+SP)), observam-se valores inferiores de resistência à flexão, para todas as misturas ternárias estudadas. Porém, as misturas 80C+15FCC+5rPC(+SP) e 80C+10FCC+10rPC(+SP) recuperam, relativamente à percentagem de substituição de cimento por resíduos (5 e 10%), resistência à flexão ao fim de 7 dias de hidratação.

#### ❖ Resistência à compressão

Na Figura 4.31 expõe-se os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão das argamassas preparadas com substituição parcial de cimento com resíduos(s) (Quadro 3.1) para os diferentes tempos de hidratação (2, 7, 28, 56 e 90 dias). Devido à quantidade de informação contida na representação, que dificulta a leitura dos resultados, os mesmos valores são apresentados nas Figuras 4.32, 4.33, 4.36 e 4.38.

De um modo geral, as argamassas apresentam resistência à compressão que é, geralmente, incrementada com a idade, particularmente, e de forma mais significativa dos 2 para os 7 dias. Em anexo (Anexo D.3) representam-se, para cada mistura estudada, as rectas de ajuste logarítmico e respectivas equações da tensão de rotura à compressão em função da idade de cura das amostras.

Por forma a alargar-se a análise de resultados relacionaram-se os dados obtidos neste ensaio com os registados, anteriormente, no ensaio de propagação de ondas ultra-sónicas (Subsecção 3.5.1.1). No Anexo D.3 representam-se os gráficos que relacionam estas duas propriedades. Na maioria dos casos, a velocidade de propagação de ultra-sons apresentou boa correlação exponencial com a

<sup>10</sup> Recorde-se que, no presente estudo, o “índice de actividade” foi calculado conforme a equação 3.4. Neste caso (Quadro 4.17), corresponde à razão entre o valor médio de resistência à flexão de provetes de argamassa preparados com uma dada substituição de cimento por resíduos de FCC e de pedra natural calcária com a mistura 100C(+SP), para a mesma idade sob as mesmas condições.

resistência mecânica atestando ser um ensaio, não destrutivo, adequado e com sensibilidade para distinguir as características mecânicas das argamassas estudadas.

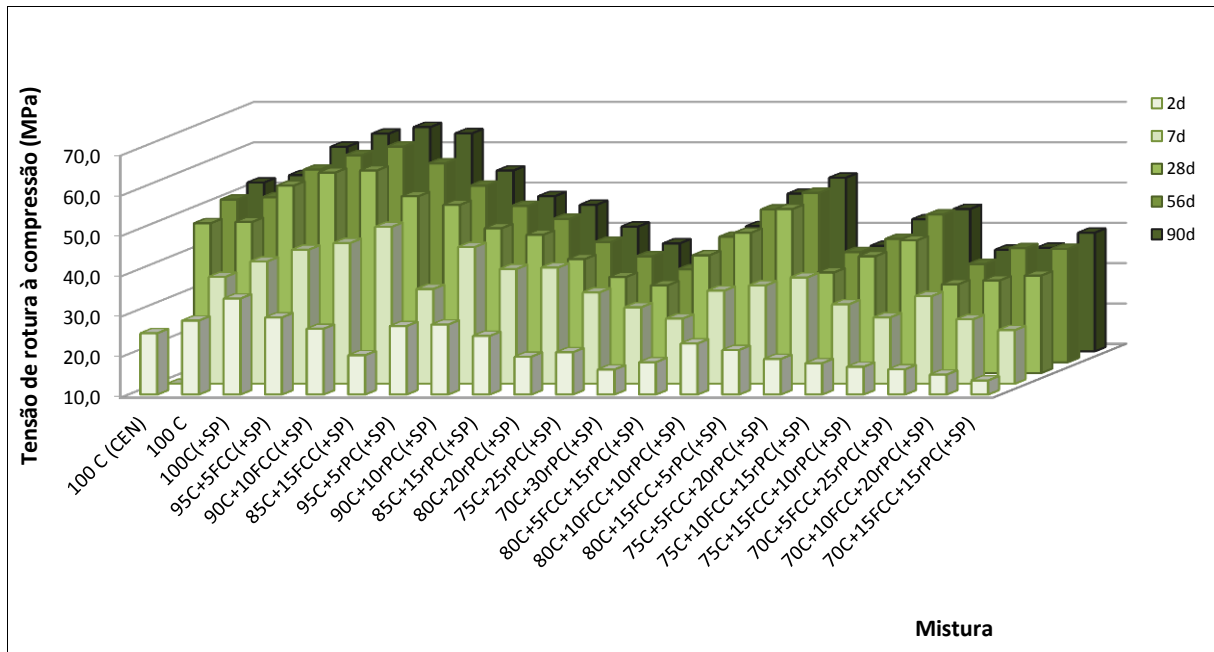


Figura 4.31 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos – estado endurecido.

Através da determinação da resistência à flexão e compressão é possível estimar o coeficiente de ductilidade, quantificado pela relação  $R_f/R_c$ . Esta relação traduz, de certa forma, a capacidade de deformação das misturas sob solicitações mecânicas, atendendo a que, quanto maior for este quociente, maior é a ductilidade do material. Em suma, da análise dos valores indicados nos Quadros 4.20, 4.23, 4.26 e 4.29 constata-se que as argamassas estudadas apresentam reduzida ductilidade, sendo a tensão de flexão bastante inferior à de compressão. Observa-se que, quanto maior a resistência à compressão, menor a capacidade que a argamassa possui em suportar uma deformação plástica sem rotura. Verifica-se, também, que a razão das resistências das diferentes misturas se manteve praticamente constante ao longo do tempo.

(i) Observações à família de misturas de referência:

Na Figura 4.32 representam-se os dados do ensaio de resistência à compressão das argamassas, pertencentes à família das misturas de referência, expostos no Quadro 4.18, e as expressões das equações logarítmicas que relacionam as resistências em função do tempo de hidratação.

Na comparação das argamassas de referência fabricadas com areias normalizadas, comercial - 100C(CEN) - e produzida em laboratório - 100C - observa-se a tendência da mistura 100C(CEN) apresentar tensão de rotura à compressão menor do que a 100C, sendo esta diferença mais

expressiva aos 2 e aos 7 dias de idade, à semelhança do que se verificou no ensaio de resistência à flexão (Quadro 4.10). Estas diferenças, nos valores de resistência, contudo, não foram evidenciadas pelos registos da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (Quadro 4.5).

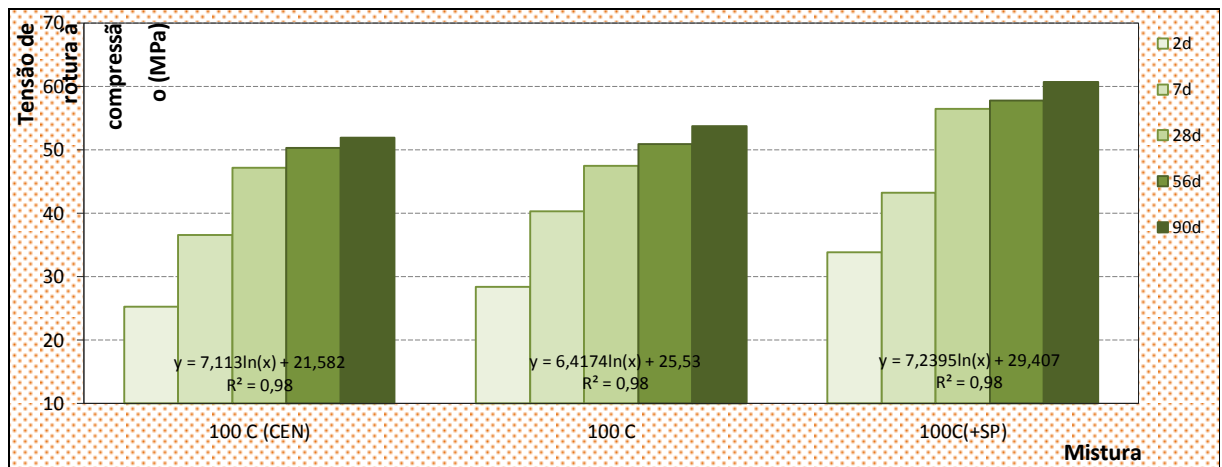


Figura 4.32 - Evolução da tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas da família de referência. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à compressão em função do tempo de hidratação).

Quadro 4.18 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas da família de referência – estado endurecido.

Idade (dias)	2		7		28		56		90	
	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)
100C(CEN)	6	25,2 ± 0,9	6	36,5 ± 0,5	12	47,1 ± 1,0	6	50,3 ± 0,3	6	51,9 ± 0,5
100C	6	28,3 ± 0,9	6	40,3 ± 0,7	12	47,4 ± 0,5	6	50,9 ± 0,9	6	53,7 ± 1,1
100C(+SP)	6	33,8 ± 0,6	6	43,2 ± 1,3	12	56,5 ± 1,0	6	57,8 ± 0,6	6	60,7 ± 0,8

N - Número de amostras ensaiadas.

Quadro 4.19– Índice de actividade<sup>11</sup> (IA), da família de referência, com base na resistência à compressão.

Mistura	IA (%)				
	2d	7d	28d	56d	90d
100C(CEN)	74,6	84,5	83,5	87,1	85,4
100C	83,8	93,3	84,0	88,1	88,4
<b>100C(+SP)</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

d - dias.

Segundo a apreciação do Quadro 4.19, no qual se apresenta a relação entre os valores médios de resistência à compressão entre as argamassas preparadas com areias normalizadas comercial e misturada em laboratório, e a mistura 100C(+SP), para a mesma idade e sob as mesmas condições,

<sup>11</sup> Relembra-se que, no presente estudo, o “índice de actividade” foi calculado conforme a equação 3.4. Neste caso (Quadro 4.19), corresponde à razão entre os valores médios de resistência à compressão de provetes de argamassa preparados com areia normalizada comercial e misturada em laboratório e a mistura 100C(+SP), para a mesma idade e sobre as mesmas condições.

verifica-se que a mistura realizada com superplastificante 100C(+SP) apresenta, para todas as idades, resistências superiores comparativamente à mistura sem superplastificante 100C, de acordo com o que se esperaria aquando da adição de um composto desta natureza [9,54,53,52,46,8]. A diferença de resistências à compressão nas argamassas sem e com superplastificante não é, no entanto, evidenciada nos registos das velocidades de propagação da onda ultra-sónica (Quadro 4.5).

**Quadro 4.20 - Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ ), para os diferentes tempos de hidratação, da família de referência.**

Idade (dias)	2	7	28	56	90
Mistura	Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ )				
100C(CEN)	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
100C	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3
100C(+SP)	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2

$R_f$  - resistência à flexão (MPa);

$R_c$  - resistência à compressão (MPa).

O coeficiente de ductilidade determina-se pelo quociente entre as resistências à flexão e à compressão, conforme explicado anteriormente. No Quadro 4.20 observa-se que as argamassas da família de referência revelam, tendencialmente, perda de ductilidade à medida que aumenta a idade de hidratação.

(ii) Observações à família das misturas binárias:

A Figura 4.33 representa os valores de resistência à compressão médios, presentes, também, no Quadro 4.21, determinados para as misturas de cimento com substituição parcial deste por resíduo de FCC.

Segundo a observação dos registos (Quadro 4.21) detecta-se um aumento da resistência à compressão mediante a idade de hidratação das argamassas. Atendendo às equações das linhas de tendência logarítmica, apresentadas na mesma figura, verifica-se a existência de correlação da resistência à compressão em função do tempo de hidratação.

De entre as composições estudadas com substituição parcial de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica é a mistura 90C+10FCC(+SP) que apresenta maior resistência à compressão.

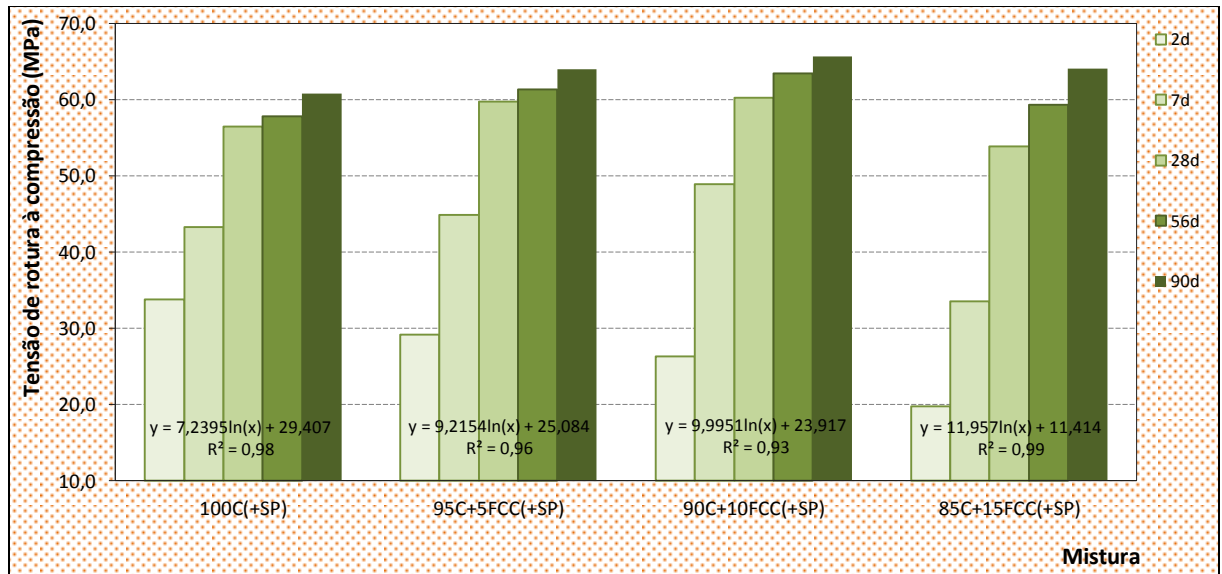


Figura 4.33 – Evolução da tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticas das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à flexão em função do tempo de hidratação).

Quadro 4.21 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido.

Idade (dias)	2		7		28		56		90	
Mistura	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)
100C(+SP)	6	33,8 ± 0,6	6	43,2 ± 1,3	12	56,5 ± 1,0	6	57,8 ± 0,6	6	60,7 ± 0,8
95C+5FCC(+SP)	6	29,1 ± 1,9	6	44,9 ± 1,3	12	59,7 ± 1,5	6	61,3 ± 0,7	6	64,0 ± 1,3
90C+10FCC(+SP)	6	26,3 ± 1,8	6	48,9 ± 0,8	12	60,2 ± 1,1	6	63,4 ± 0,7	6	65,6 ± 1,3
85C+15FCC(+SP)	6	19,7 ± 1,0	6	33,5 ± 2,5	12	53,8 ± 1,6	6	59,3 ± 2,3	6	64,1 ± 1,1

N - Número de amostras ensaiadas.

Quadro 4.22 - Índice de actividade<sup>12</sup> (IA), das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias), com base na resistência à compressão.

Mistura	IA (%)				
	2d	7d	28d	56d	90d
100C(+SP)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
95C+5FCC(+SP)	86,2	103,9	105,7	106,1	105,4
90C+10FCC(+SP)	77,8	113,1	106,6	109,8	108,1
85C+15FCC(+SP)	58,4	77,5	95,3	102,6	105,5

d - dias.

<sup>12</sup> Recorde-se que, no presente estudo, o “índice de actividade” foi calculado conforme a equação 3.4. No caso (Quadro 4.11), corresponde à razão entre os valores médios de resistência à compressão de provetes de argamassa preparados com uma dada substituição de cimento por resíduo de FCC e a mistura 100C(+SP), para a mesma idade sob as mesmas condições.

Pela apreciação dos registos do Quadro 4.21 verifica-se que a substituição parcial de cimento por 5, 10 e 15% de resíduo de FCC se reflecte num atraso na aquisição da resistência à compressão. Contudo, as misturas com 5 e 10% de incorporação recuperam e ultrapassam a resistência da mistura sem resíduos, a partir dos 7 dias de hidratação, sendo notória a evolução da recuperação da mistura 90C+10FCC(+SP). A mistura com 15% de incorporação recupera a resistência aos 56 dias de idade. Estas constatações estão patentes no Quadro 4.22, no qual se apresentam os valores dos índices de actividade destas misturas, e na Figura 4.34 que ilustra a evolução, ao longo do tempo de hidratação, da tensão de rotura à compressão média para as misturas binárias com substituição parcial de cimento por resíduo de FCC.

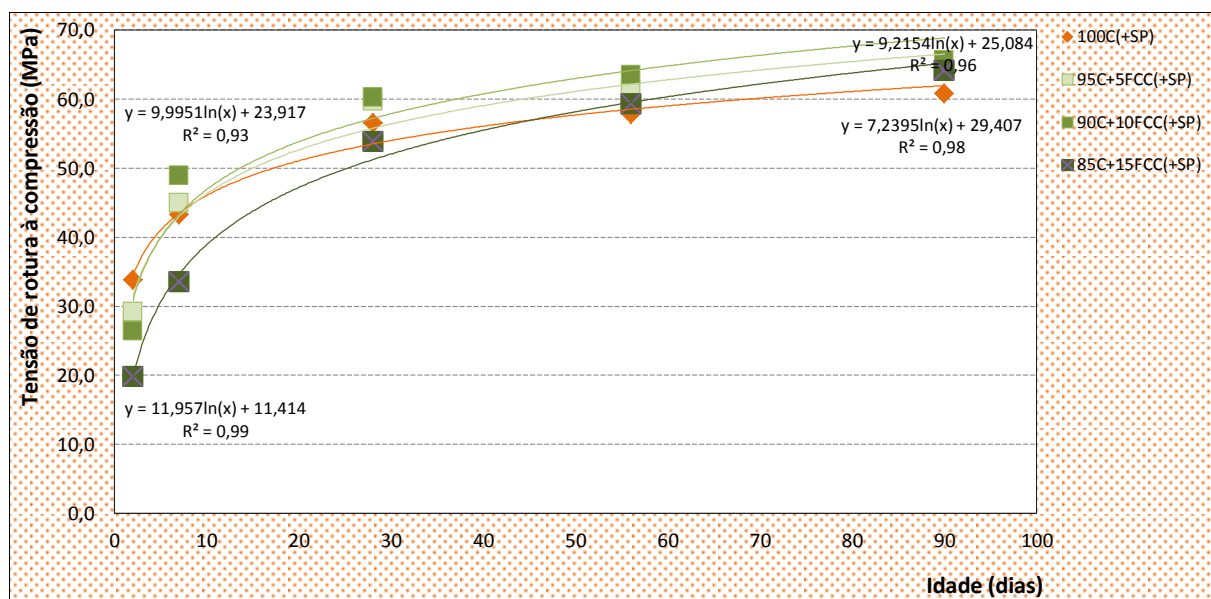


Figura 4.34 - Tensão média de rotura à compressão média (MPa), avaliada em provetes prismáticos, das misturas consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas apresentadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à compressão em função do tempo de hidratação).

Conforme exposto, anteriormente (Secção 2.3.1), o cimento anidro é constituído, essencialmente, pelos seguintes compostos químicos  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  e  $CH$  [29]. As reacções de hidratação [31,21] dos constituintes do cimento (Secção 2.3.2) originam, principalmente, os compostos C-S-H, C-H e C-A(F)-H [60]. Por sua vez, os constituintes do resíduo de FCC, essencialmente, aluminossilicatos e alumina reagem com a água e com o CH (que se forma nas reacções de hidratação dos  $C_3S$  e  $C_2S$  do cimento), para formarem os compostos C-S-H e C-A(F)-H - esta reacção designa-se por “reacção pozolânica” [60]. Estes compostos, com natureza química semelhante aos obtidos nas reacções de hidratação do cimento, podem, no entanto, ser mais densos ou contribuir para a densificação da

matriz do cimento, que se pode traduzir num aumento da resistência mecânica e da durabilidade [7,60].

A reacção pozolânica começa a ocorrer mais tarde do que as reacções de hidratação do cimento, uma vez que já se tinha formado CH pelo que, nas primeiras idades de hidratação, não é esperado que as misturas, contendo resíduo da indústria petroquímica, apresentem resistências mecânicas superiores (Secção 2.4.1), podendo, no entanto, haver uma evolução e recuperação destas ao longo do tempo, se os catalisadores forem suficientemente activos para superarem o efeito da diluição do cimento com a substituição parcial deste por outros compostos.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência mecânica à compressão estão coerentes com os registos anteriores: (i) a consistência das argamassas aumenta com o aumento da incorporação de resíduo de FCC (Figura 4.6); (ii) regista-se, tendencialmente, a diminuição do valor da massa volúmica (Figura 4.9); (iii) o teor de ar das misturas aumenta com a substituição de cimento por este resíduo (Figura 4.12); e (iv) a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas é superior na mistura com 10% de substituição de cimento por resíduo de FCC (Figura 4.18).

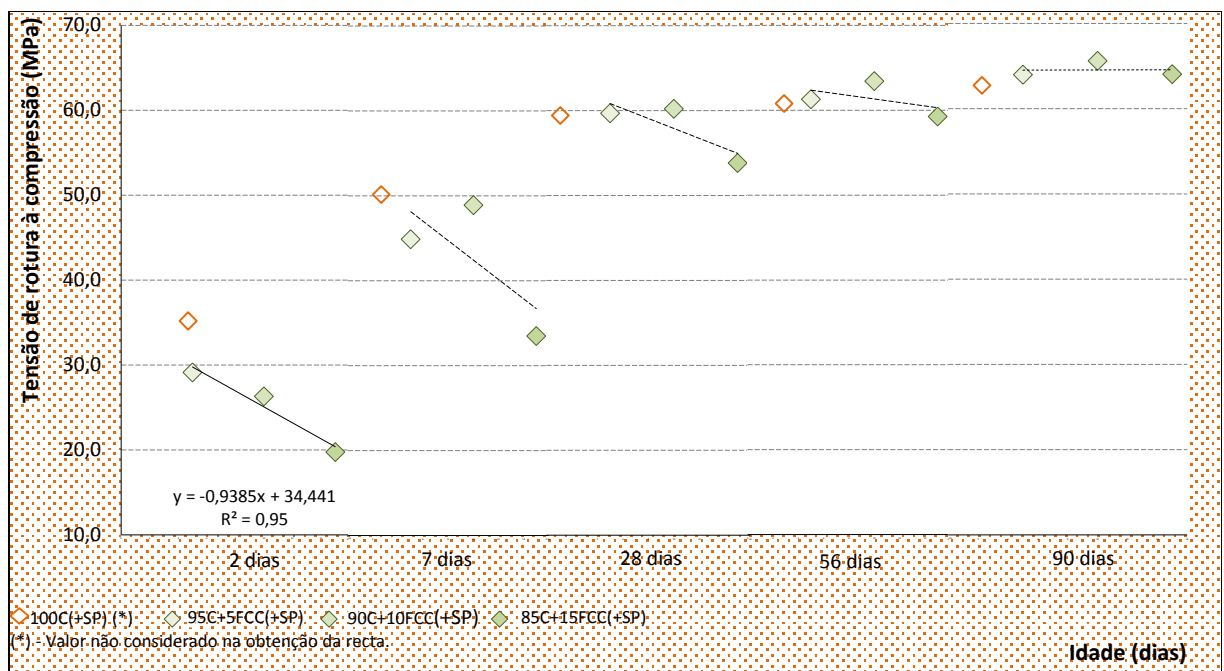


Figura 4.35 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas, consoante teor de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a resistência à compressão em função da percentagem de incorporação de resíduo de FCC. A tracejado está representada a linha de tendência entre a resistência à compressão, em função da percentagem de incorporação de resíduos, uma vez que, o ajuste linear não foi considerado estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).

**Quadro 4.23 - Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ ), para os diferentes tempos de hidratação, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias).**

Idade (dias)	2	7	28	56	90
Mistura	Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ )				
95C+5FCC(+SP)	0,3	0,3	0,2	0,2	--
90C+10FCC(+SP)	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
85C+15FCC(+SP)	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2

$R_f$  - resistência à flexão (MPa);

$R_c$  - resistência à compressão (MPa).

Na norma NP EN 197-1 [1] expõe-se os requisitos mecânicos, expressos como valores característicos especificados, na qual se estabelece que, para a classe de resistência de cimento 42,5R, a resistência mecânica aos 2 e aos 28 dias de idade devem ser superiores a 20 e a 42,5 MPa, respectivamente.

Da análise dos dados representados na Figura 4.35, na qual se representam as resistências à compressão médias das misturas binárias com substituição parcial de cimento por resíduo de FCC, para as diferentes idade de hidratação, observa-se que as argamassas com substituição de cimento por resíduo de FCC até 15% apresentam valores de resistência que se encontram dentro dos intervalos definidos. Ou seja, a incorporação até 15% de resíduo de FCC não modifica a classe de resistência do cimento 42,5R.

No Quadro 4.23 apresentam-se os coeficientes de ductilidade, determinados para as misturas de cimento com substituição parcial deste por resíduo de FCC. Da análise do Quadro 4.23, verifica-se, ao longo do tempo, a perda de ductilidade, demonstrada, à partida, por valores de quociente ( $R_f/R_c$ ) inferiores.

Na Figura 4.36 e no Quadro 4.24 apresentam-se as tensões de rotura à compressão para as argamassas da família das misturas binárias com substituição parcial de cimento por resíduo de pedra natural.

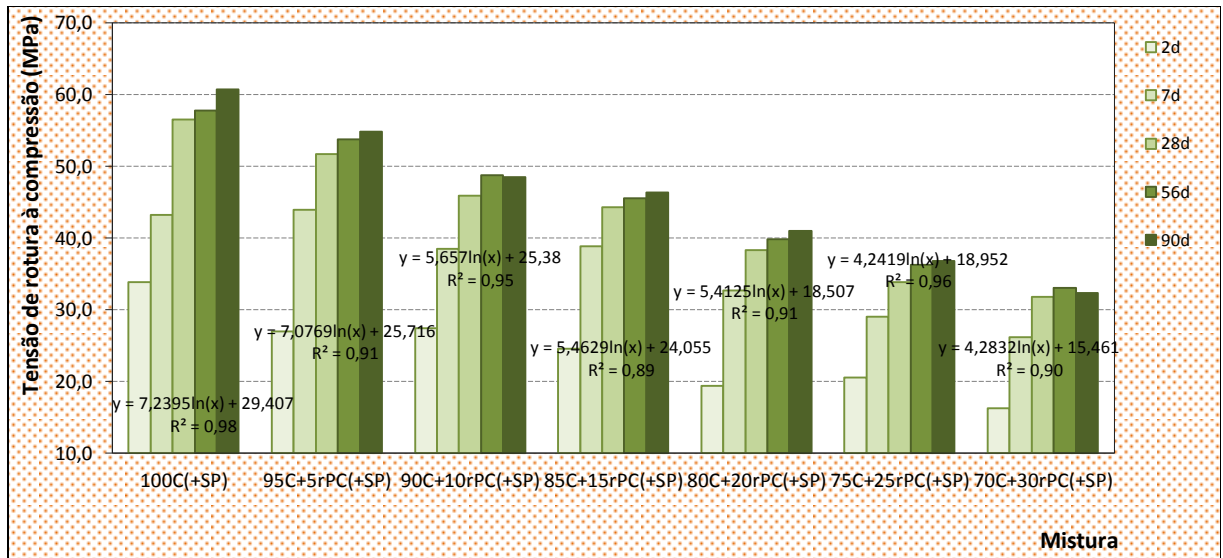


Figura 4.36 – Evolução da tensão de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem à correlação logarítmica que se verificou entre a resistência à compressão em função do tempo de hidratação).

Quadro 4.24 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família de misturas binárias) – estado endurecido.

Idade (dias)	2		7		28		56		90	
	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)
100C(+SP)	6	33,8 ± 0,6	6	43,2 ± 1,3	12	56,5 ± 1,0	6	57,8 ± 0,6	6	60,7 ± 0,8
95C+5rPC(+SP)	6	27,0 ± 1,4	6	43,9 ± 0,7	12	51,7 ± 1,4	6	53,8 ± 1,2	6	54,8 ± 1,1
90C+10rPC(+SP)	6	27,3 ± 0,8	6	38,4 ± 0,6	12	45,9 ± 0,6	6	48,8 ± 0,4	6	48,5 ± 0,8
85C+15rPC(+SP)	6	24,5 ± 0,7	6	38,8 ± 0,5	12	44,3 ± 1,1	6	45,5 ± 0,8	6	46,4 ± 2,2
80C+20rPC(+SP)	6	19,4 ± 1,3	6	32,7 ± 0,6	12	38,2 ± 0,9	6	39,8 ± 0,7	6	40,9 ± 0,6
75C+25rPC(+SP)	6	20,5 ± 0,3	6	29,0 ± 1,1	12	33,8 ± 1,1	6	36,3 ± 0,6	6	36,8 ± 1,5
70C+30rPC(+SP)	6	16,2 ± 0,3	6	26,1 ± 0,6	12	31,7 ± 0,9	6	33,0 ± 0,8	6	32,3 ± 0,5

N - Número de amostras ensaiadas.

Conforme a análise de dados, presentes no Quadro 4.25, no qual se apresenta o índice de actividade das misturas com substituição parcial de cimento por resíduo de pedra natural calcária, comparativamente à mistura de referência – 100C(+SP), observa-se que, contrariamente ao resíduo de FCC, o resíduo de pedra natural (de natureza calcária) promove a diminuição da resistência à compressão, em todas as idades, para as percentagens de substituição até 30% (Figura 4.36). Esta observação é justificada (Secção 2.4.2), pela diminuição do teor de ligante hidráulico, devido ao “efeito de diluição” [62];

Quadro 4.25 - Índice de actividade<sup>13</sup> (IA), das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias), com base na resistência à compressão.

Mistura	IA(%)				
	2d	7d	28d	56d	90d
100C(+SP)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
95C+5rPC(+SP)	79,8	101,6	91,6	93,1	90,3
90C+10rPC(+SP)	80,9	88,9	81,3	84,4	79,8
85C+15rPC(+SP)	72,6	89,8	78,4	78,8	76,3
80C+20rPC(+SP)	57,3	75,5	67,7	68,9	67,4
75C+25rPC(+SP)	60,6	67,0	59,9	62,8	60,5
70C+30rPC(+SP)	47,9	60,5	56,2	57,2	53,2

d - dias.

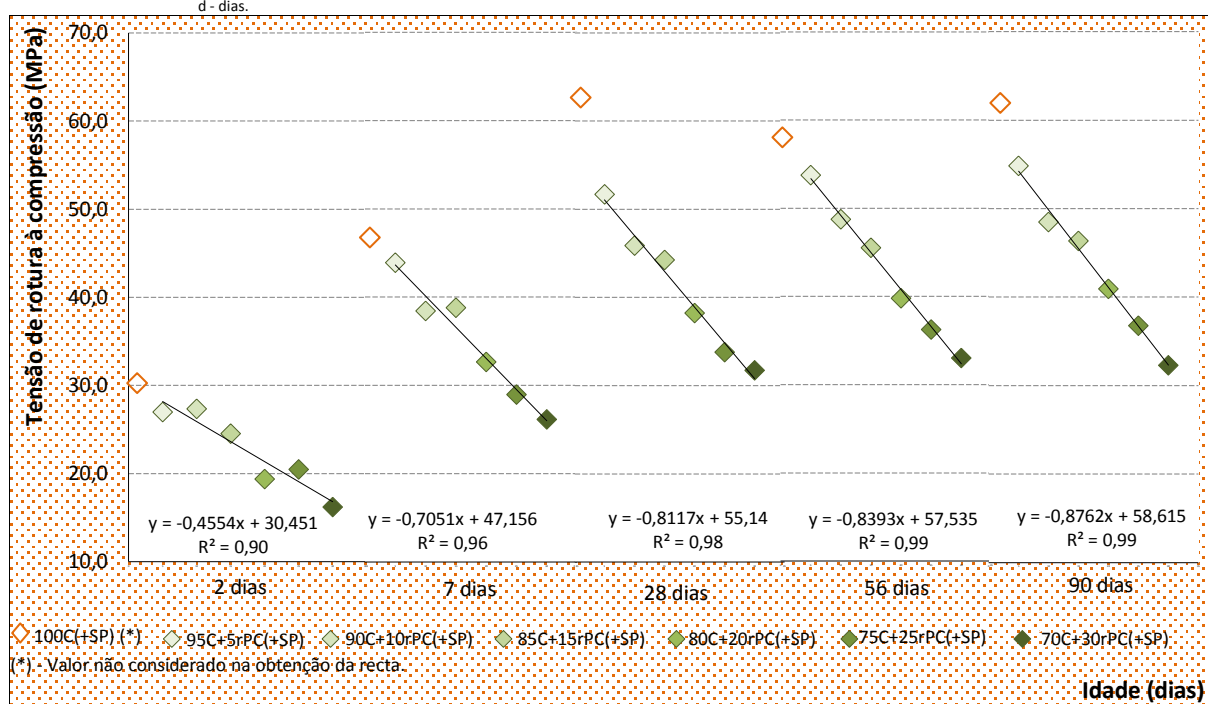


Figura 4.37 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos das misturas, consoante teor de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre a resistência à compressão em função da percentagem de incorporação de resíduo de pedra natural).

Da análise da Figura 4.37, que ilustra a tensão de rotura à compressão média consoante a percentagem de incorporação de resíduo de pedra natural, observa-se para todas as idades estudadas - 2, 7, 28, 56 e 90 dias – que o aumento da percentagem de substituição de cimento por este resíduo, até 30%, se traduz na diminuição linear da resistência à compressão. O facto de a resistência mecânica à compressão diminuir progressivamente à medida que o teor de cimento é substituído por resíduo de pedra calcária está de acordo com o que se observou nos outros ensaios experimentais: (i) a consistência das argamassas diminui (verificando-se um valor atípico aos 20% de

<sup>13</sup> Repare-se que, no presente estudo, o “índice de actividade” foi calculado conforme a equação 3.4. Neste caso (Quadro 4.25), corresponde à razão entre os valores médios de resistência à compressão de provetes de argamassa preparados com uma dada substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária e a mistura 100C(+SP), para a mesma idade sob as mesmas condições.

substituição) com o aumento da incorporação de resíduo de pedra natural (Figura 4.6); (ii) até aos 20% de substituição de cimento por resíduo de pedra natural regista-se, tendencialmente, a diminuição do valor da massa volúmica (Figura 4.9); (iii) o teor de ar das misturas aumenta (registando-se um valor anómalo aos 20% de substituição) com a substituição de cimento por este resíduo (Figura 4.12); e (iv) a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas diminui com o aumento da incorporação de resíduo (Figura 4.20).

Verifica-se, em geral, para todas as misturas um aumento da resistência ao longo dos períodos avaliados. No entanto, em algumas misturas que contêm resíduo de pedra natural, observam-se pequenas variações aos 90 dias. Além das justificações já apresentadas para este fenómeno (Subsecção 4.3.2.1), esta oscilação, pode estar relacionada com a heterogeneidade do resíduo de pedra natural utilizado nos ensaios, sendo que é esperado um aumento gradual da resistência mecânica, à medida que progride a reacção de hidratação do cimento e que ocorre o endurecimento da argamassa.

Comparando os resultados observados com os requisitos mecânicos para o cimento 42,5R, definidos na norma NP EN 197-1 [1], conclui-se que as argamassas com substituição de cimento por resíduo de pedra calcária até 15% apresentam valores de resistência que se encontram dentro dos intervalos definidos por esta norma. Ou seja, a incorporação até 15% (inclusive) por resíduo de pedra natural não altera a classe de resistência do cimento, 42,5R.

O Quadro 4.26 apresenta os coeficientes de ductilidade calculados para as misturas de cimento com incorporação de resíduo de pedra natural calcária. Segundo a análise de dados, presentes neste quadro, verifica-se que a incorporação de resíduo de pedra natural conduz a coeficientes de ductilidade superiores comparativamente à argamassa de referência - 100C(+SP).

**Quadro 4.26 - Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ ), para os diferentes tempos de hidratação, das misturas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias).**

Idade (dias)	2	7	28	56	90
Mistura	Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ )				
95C+5rPC(+SP)	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2
90C+10rPC(+SP)	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
85C+15rPC(+SP)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
80C+20rPC(+SP)	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3
75C+25rPC(+SP)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
70C+30rPC(+SP)	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3

$R_f$  - resistência à flexão (MPa);

$R_c$  - resistência à compressão (MPa).

(iii) Observações à família das misturas ternárias:

A Figura 4.38 representa os valores médios de resistência à compressão, sintetizados no Quadro 4.27, bem como, as expressões das equações das linhas de tendência, associados a cada mistura, em função do tempo de hidratação. Segundo a observação da figura verifica-se, ao longo do tempo de hidratação, um aumento da tensão de rotura à compressão.

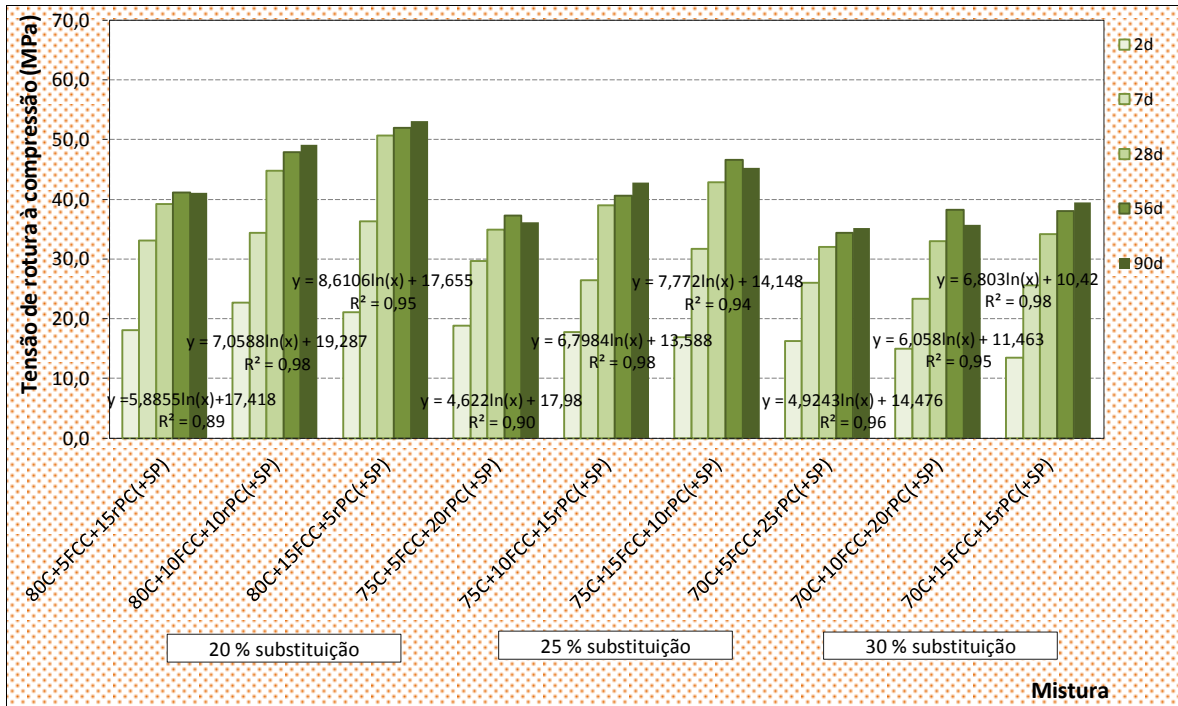


Figura 4.38 - Evolução da tensão média de rotura à compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos da família de misturas ternárias – estado endurecido. (As expressões das equações, correspondem às rectas de ajuste logarítmico que se verificou entre a tensão de rotura à flexão em função do tempo de hidratação).

Quadro 4.27 - Tensão média de rotura à compressão (MPa) (média±desvio padrão), avaliada em provetes prismáticos, da família das misturas ternárias – estado endurecido.

Idade (dias)	2		7		28		56		90	
	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)	N	Tensão de rotura à compressão (MPa)
100C(+SP)	6	33,8 ± 0,6	6	43,2 ± 1,3	12	56,5 ± 1,0	6	57,8 ± 0,6	6	60,7 ± 0,8
80C+5FCC+15rPC(+SP)	6	18,0 ± 0,8	6	33,1 ± 0,5	12	39,2 ± 0,7	6	41,1 ± 0,5	6	41,0 ± 0,7
80C+10FCC+10rPC(+SP)	6	22,7 ± 0,3	6	34,4 ± 0,9	12	44,8 ± 1,0	6	47,9 ± 0,7	6	49,1 ± 0,9
80C+15FCC+5rPC(+SP)	6	21,0 ± 0,4	6	36,4 ± 0,6	12	50,7 ± 0,7	6	52,0 ± 1,0	6	53,1 ± 2,3
75C+5FCC+20rPC(+SP)	6	18,8 ± 0,5	6	29,7 ± 0,7	12	34,9 ± 0,9	6	37,3 ± 0,9	6	36,2 ± 0,9
75C+10FCC+15rPC(+SP)	6	17,8 ± 0,3	6	26,5 ± 0,7	12	38,9 ± 0,6	6	40,6 ± 0,8	6	42,8 ± 0,6
75C+15FCC+10rPC(+SP)	6	16,9 ± 0,4	6	31,7 ± 0,6	12	42,9 ± 0,9	6	46,6 ± 0,7	6	45,3 ± 0,9
70C+5FCC+25rPC(+SP)	6	16,3 ± 0,2	6	26,0 ± 0,4	12	32,0 ± 0,5	6	34,3 ± 0,5	6	35,2 ± 1,5
70C+10FCC+20rPC(+SP)	6	14,9 ± 0,8	6	23,3 ± 0,2	12	33,0 ± 0,5	6	38,3 ± 0,9	6	35,7 ± 0,8
70C+15FCC+15rPC(+SP)	6	13,5 ± 0,5	6	25,6 ± 0,2	12	34,2 ± 0,5	6	38,1 ± 0,3	6	39,4 ± 0,5

N - Número de amostras ensaiadas.

A substituição do cimento por resíduos industriais, em misturas ternárias, ostenta resistências mecânicas à compressão inferiores (Quadro 4.27) comparativamente à argamassa de referência (100C(+SP)). Este resultado está de acordo com os registos obtidos no ensaio não-destrutivo (Figura 4.22), uma vez que, também, a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas apresenta a mesma tendência.

O Quadro 4.28 sintetiza o índice de actividade que, no caso do presente estudo, foi determinado pela razão entre os valores médios de tensão de rotura à compressão de provetes de argamassa com uma dada substituição de cimento por resíduos sólidos industriais (catalisador exausto da indústria petroquímica e resíduo de pedra natural).

Analisando os resultados (Quadro 4.28), verifica-se que os resultados obtidos confirmam o previsto estando de acordo com as apreciações individuais, efectuadas anteriormente. Ou seja, para o aumento de incorporação de FCC, e conseqüente diminuição do teor de resíduo de *filler*, previa-se o aumento da tensão de rotura à compressão, estando, no entanto, este aumento, dependente da capacidade do catalisador em superar o efeito da diluição do cimento com a sua substituição parcial por outros compostos, tal como referido anteriormente.

**Quadro 4.28 - Índice de actividade<sup>14</sup> (IA), da família das misturas ternárias, com base na resistência à compressão.**

Mistura	IA (%)				
	2d	7d	28d	56d	90d
<b>100C(+SP)</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
80C+5FCC+15rPC(+SP)	53,3	76,5	69,4	71,1	67,6
80C+10FCC+10rPC(+SP)	67,0	79,5	79,3	82,9	80,9
80C+15FCC+5rPC(+SP)	62,2	84,1	89,7	90,0	87,4
75C+5FCC+20rPC(+SP)	55,6	68,7	61,9	64,6	59,6
75C+10FCC+15rPC(+SP)	52,5	61,2	69,0	70,2	70,4
75C+15FCC+10rPC(+SP)	49,9	73,4	76,0	80,7	74,6
70C+5FCC+25rPC(+SP)	48,1	60,1	56,7	59,4	58,0
70C+10FCC+20rPC(+SP)	44,2	53,9	58,4	66,3	58,7
70C+15FCC+15rPC(+SP)	39,9	59,2	60,5	65,9	64,9

d - dias.

A norma NP EN 197-1 [1] estipula os requisitos mecânicos expressos como valores característicos especificados, na qual se estabelece que, para a classe de resistência de cimento 42,5 R, as resistências mecânicas aos 2 e aos 28 dias de idade, devem ser superiores a 20 e a 42,5MPa, respectivamente. Aquando a comparação das resistências à compressão obtidas experimentalmente

<sup>14</sup> Refere-se que, no presente estudo, o “índice de actividade” foi calculado conforme a equação 3.4. Neste caso (Quadro 4.28), corresponde à razão entre os valores médios de resistência à compressão de provetes de argamassa preparados com uma dada substituição de cimento por resíduos de FCC e de pedra natural calcária com a mistura 100C(+SP), para a mesma idade sob as mesmas condições.

(Quadro 4.27) com as requeridas pela norma NP EN 197-1 [1] para o cimento 42,5R, observa-se que as misturas que se encontram dentro dos limites definidos são: 80C+10FCC+10rPC(+SP) e 80+15FCC+5rPC(+SP). Isto é, nestas misturas ternárias com substituição de cimento por 20% de resíduos sólidos industriais não há alteração da classe de resistência do cimento 42,5R.

O Quadro 4.29 apresenta os coeficientes de ductilidade, determinado para as misturas com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural calcária. Segundo a apreciação deste, as misturas ternárias com substituição de 30% de cimento por ambos os resíduos apresentam coeficientes de ductilidade superiores.

**Quadro 4.29 - Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ ), para os diferentes tempos de hidratação, da família das misturas ternárias).**

Idade (dias)	2	7	28	56	90
Mistura	Coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ )				
80C+5FCC+15rPC(+SP)	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3
80C+10FCC+10rPC(+SP)	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
80C+15FCC+5rPC(+SP)	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
75C+5FCC+20rPC(+SP)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
75C+10FCC+15rPC(+SP)	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2
75C+15FCC+10rPC(+SP)	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
70C+5FCC+25rPC(+SP)	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
70C+10FCC+20rPC(+SP)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
70C+15FCC+15rPC(+SP)	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3

$R_f$  - resistência à flexão (MPa);

$R_c$  - resistência à compressão (MPa).

#### 4.3.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados obtidos experimentalmente no ensaio de absorção de água por capilaridade contribuem para a caracterização dos materiais cimentícios, em particular, no que se refere à sua durabilidade.

O ensaio de absorção por capilaridade foi efectuado sobre dois provetes para cada mistura (Subsecção 3.5.1.3). Por forma a se proceder à comparação do comportamento das misturas estudadas, apresentam-se as curvas médias de absorção de água por capilaridade, bem como, a ascensão da franja líquida média, observada nos provetes ensaiados.

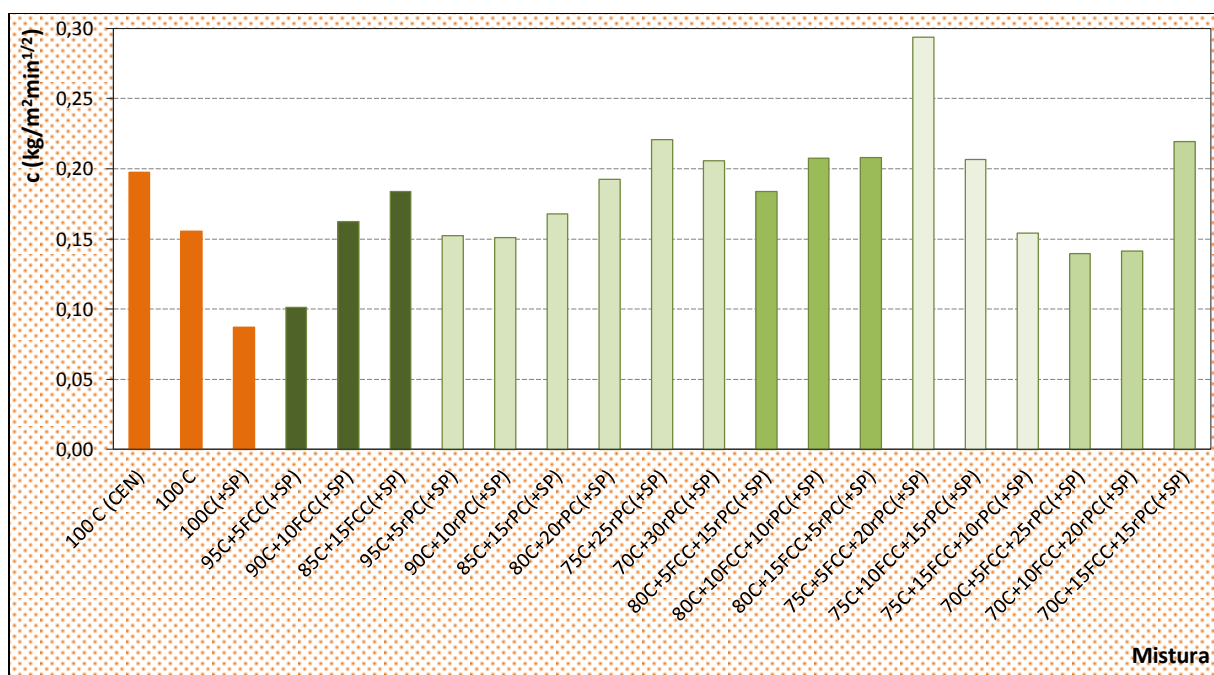


Figura 4.39 - Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ ) das misturas estudadas – estado endurecido.

Quadro 4.30 - Coeficiente de capilaridade,  $c$  ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ ), das argamassas das misturas estudadas de acordo com a respectiva família – estado endurecido.

Família	Mistura	$c$ ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ )	Família	Mistura	$c$ ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ )	Família	Mistura	$c$ ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ )
				95C+5FCC(+SP)	0,10		80C+5FCC+15rPC(+SP)	0,18
				90C+10FCC(+SP)	0,16		80C+10FCC+10rPC(+SP)	0,21
				85C+15FCC(+SP)	0,18		80C+15FCC+5rPC(+SP)	0,21
	100C(CEN)	0,20		95C+5rPC(+SP)	0,15		75C+5FCC+20rPC(+SP)	0,29
Referência	100C	0,16	Misturas binárias	90C+10rPC(+SP)	0,15	Misturas ternárias	75C+10FCC+15rPC(+SP)	0,21
	100C(+SP)	0,09		85C+15rPC(+SP)	0,17		75C+15FCC+10rPC(+SP)	0,15
				80C+20rPC(+SP)	0,19		70C+5FCC+25rPC(+SP)	0,14
				75C+25rPC(+SP)	0,22		70C+10FCC+20rPC(+SP)	0,14
				70C+30rPC(+SP)	0,21		70C+15FCC+15rPC(+SP)	0,22

$c$  - coeficiente de capilaridade ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ ).

Os coeficientes de capilaridade médios (Figura 4.39) são, determinados a partir das respectivas curvas de absorção de água por capilaridade, também, apresentados no Quadro 4.30. Este coeficiente, calculado conforme a equação 3.6 descrita na Subsecção 3.5.1.3, traduz a velocidade com que a absorção se processa nos instantes iniciais, tendo-se considerado, para o efeito, os primeiros 90 minutos de ensaio. Recorde-se que, tal como descrito anteriormente, uma argamassa que apresente menor coeficiente de absorção por capilaridade está, à partida, mais protegida de mecanismos de degradação, principalmente, de ciclos de gelo/degelo.

À semelhança das análises realizadas anteriormente, a apresentação e discussão de resultados faz-se para cada família de misturas estudadas.

## (i) Observações à família de referência:

As Figuras 4.40 e 4.41 ilustram, respectivamente, a relação entre a quantidade de água absorvida por capilaridade (por unidade de área da base do prisma) com a raiz quadrada do tempo decorrido e a altura média de ascensão capilar nas faces laterais do provete, ao longo do período de ensaio, para a família das misturas de referência.

Pela observação da Figura 4.40 verifica-se que a mistura com areia normalizada comercial - 100C(CEN) - absorve mais água comparativamente à argamassa de referência produzida com areia normalizada misturada em laboratório (100C). Esta constatação é, também, revelada na Figura 4.41, na qual se observa maior ascensão da franja líquida média nas faces laterais dos prismas sujeitos a ensaio.

Segundo a análise do Quadro 4.30, apresentado anteriormente, observa-se que a argamassa produzida com areia normalizada comercial exhibe coeficiente de capilaridade superior, estando esta apreciação em concordância com o referido.

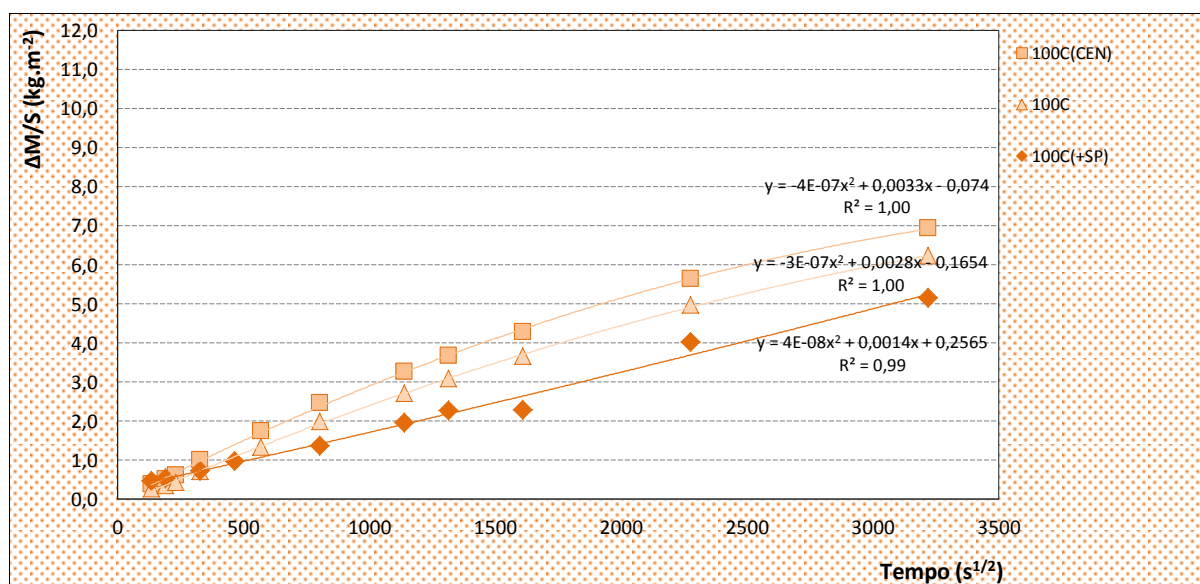


Figura 4.40 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, das misturas da família de referência – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido).

A argamassa da mistura de referência com superplastificante, 100C(+SP), embebe menor quantidade de água relativamente à argamassa da mistura de referência, 100C (Figura 4.40). Comparando os coeficientes de capilaridade obtidos para as argamassas 100C e 100C(+SP), verifica-se que a mistura com superplastificante apresenta coeficiente de capilaridade inferior (Quadro 4.30), pelo que se

supõe que esta esteja mais protegida dos agentes exteriores. De modo a confirmar esta apreciação, seria necessário a realização de outros ensaios.

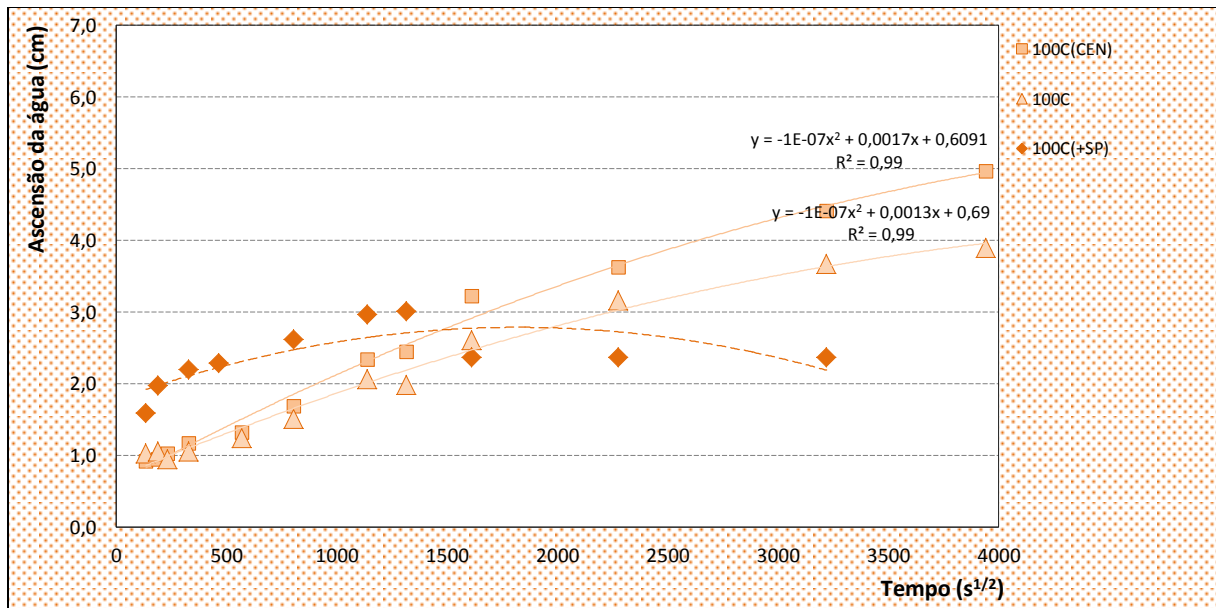


Figura 4.41 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm), determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, para as argamassas das misturas da família de referência – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido. A tracejado está representada a linha de tendência para a mistura de referência - 100C(+SP) - cujo ajuste não foi estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).

(ii) Observações à família das misturas binárias:

A Figura 4.42 ilustra os coeficientes de capilaridade médios determinados para as composições da família das misturas binárias.

Segundo a análise da Figura 4.42 observa-se que, à medida que aumenta o teor de incorporação de resíduo de FCC, se obtêm coeficientes de capilaridade superiores comparativamente à composição de referência - 100C(+SP). Efectivamente, relacionando os dados obtidos anteriormente - ensaio de fresco - verifica-se que as argamassas que apresentam teor de ar superior (Figura 4.12) correspondem a maiores coeficientes de absorção por capilaridade.

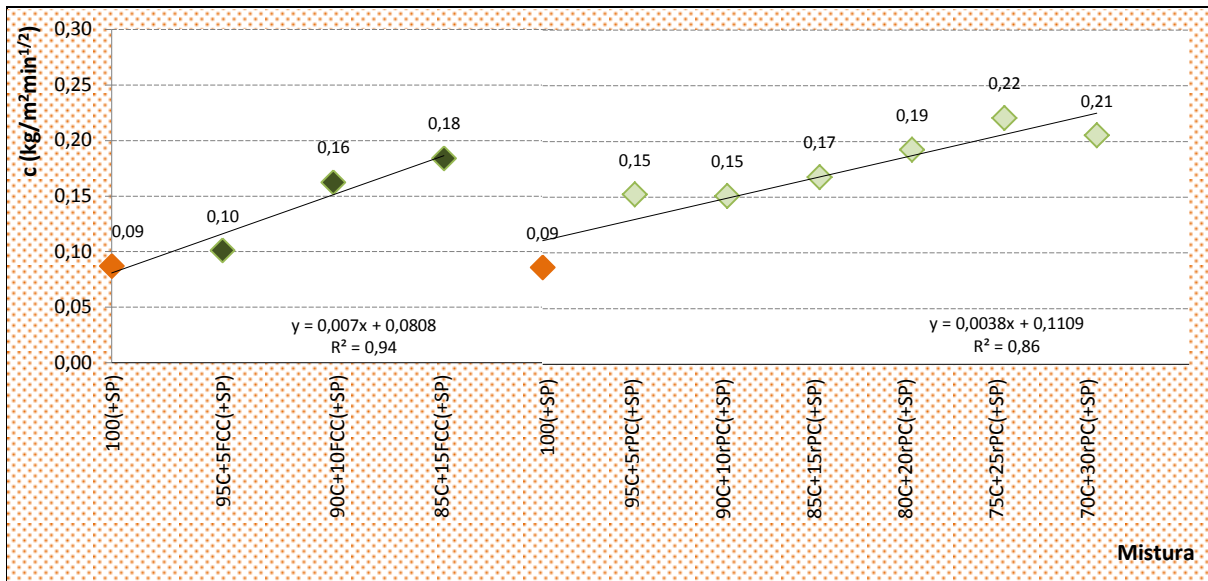


Figura 4.42 - Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ ) das argamassas da família das misturas binárias. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre o coeficiente de capilaridade em função da percentagem de incorporação de resíduos de FCC ou de pedra natural calcária, respectivamente).

As Figuras 4.43 e 4.44 representam, respectivamente, a relação entre a quantidade de água absorvida por capilaridade com a raiz quadrada do tempo e a altura média de ascensão capilar nas faces laterais do provete ao longo do período de ensaio, para as misturas com substituição parcial de cimento corrente por resíduo de FCC.

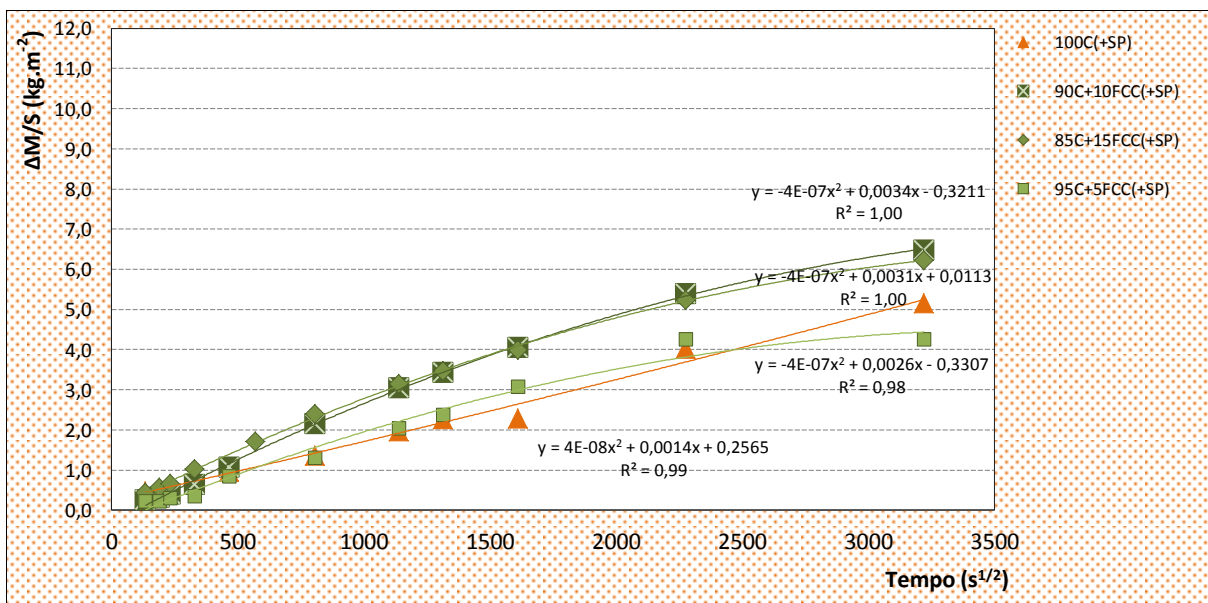


Figura 4.43 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família de misturas binárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido).

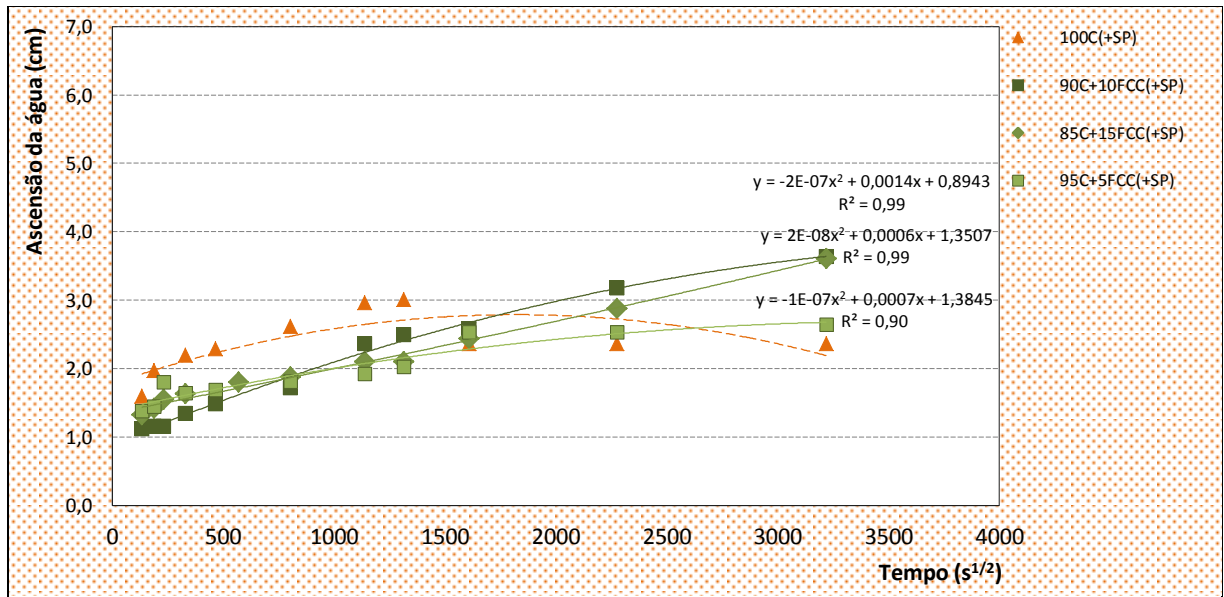


Figura 4.44 - Ascensão da franja líquida média (cm) determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, com diferentes teores de substituição de cimento por catalisador exausto da indústria petroquímica (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido. A tracejado está representada a linha de tendência para a mistura de referência - 100C(+SP) - cujo ajuste não foi estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).

Pela análise da Figura 4.44, observa-se que, a argamassa que revela menor absorção de água por capilaridade é a mistura constituída por 5% de resíduo de catalisador exausto da indústria petroquímica e os restantes por cimento corrente.

Observa-se que, ao longo do período de tempo avaliado, as misturas com maior percentual (10 e 15%) de substituição de cimento por resíduo de FCC apresentam maior capacidade de absorção de água, sendo que a mistura 95C+5FCC(+SP) revela tendência para estabilização da absorção de água ao fim de 24 horas.

Pela observação das medições da altura de ascensão capilar, efectuadas sobre as faces dos prismas analisados, presentes na Figura 4.44, verifica-se a ascensão da franja líquida capilar superior comparativamente à mistura de referência com superplastificante - 100C(+SP).

As Figuras 4.45 e 4.46 ilustram, respectivamente, a relação entre a quantidade de água embebida nos provetes sujeitos ao ensaio de capilaridade com a raiz quadrada do tempo e a altura média de ascensão capilar, observada nos mesmos provetes, nos quais se substituiu parcialmente o cimento por resíduo de pedra natural. Estas, misturas binárias, apresentam maior capacidade de absorção de água, comparativamente à argamassa de referência, 100C(+SP), segundo o presente na Figura 4.46. Esta apreciação é, também, justificada pela Figura 4.48, na qual se observa menor ascensão da franja líquida capilar média para os provetes constituídos pela mistura de referência – 100C(+SP).

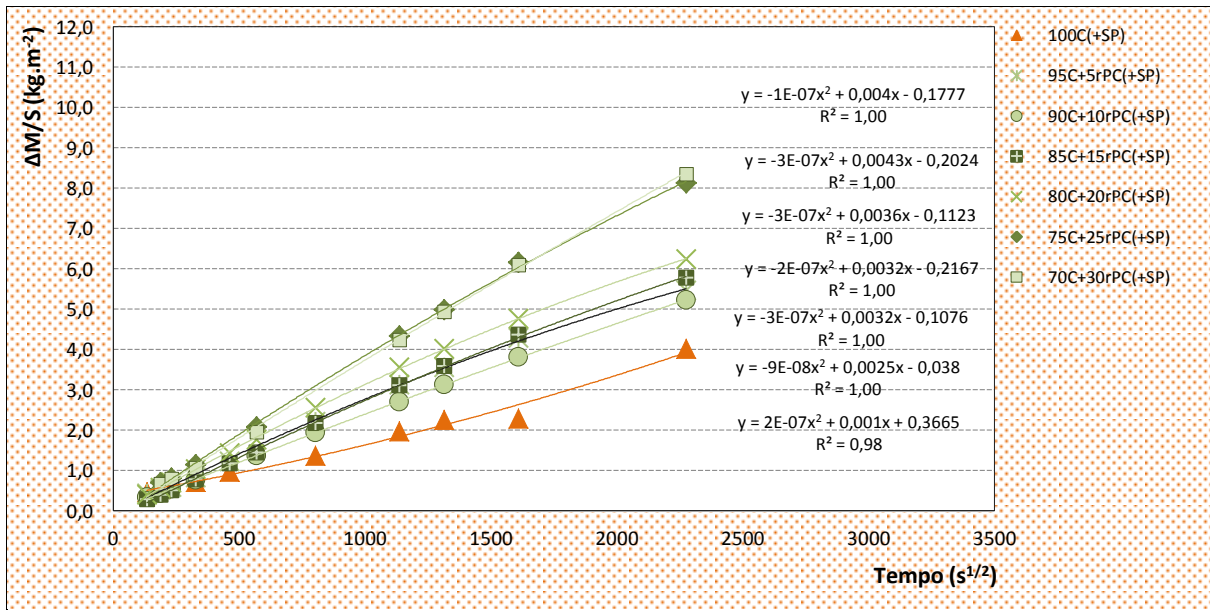


Figura 4.45 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família de misturas binárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido).

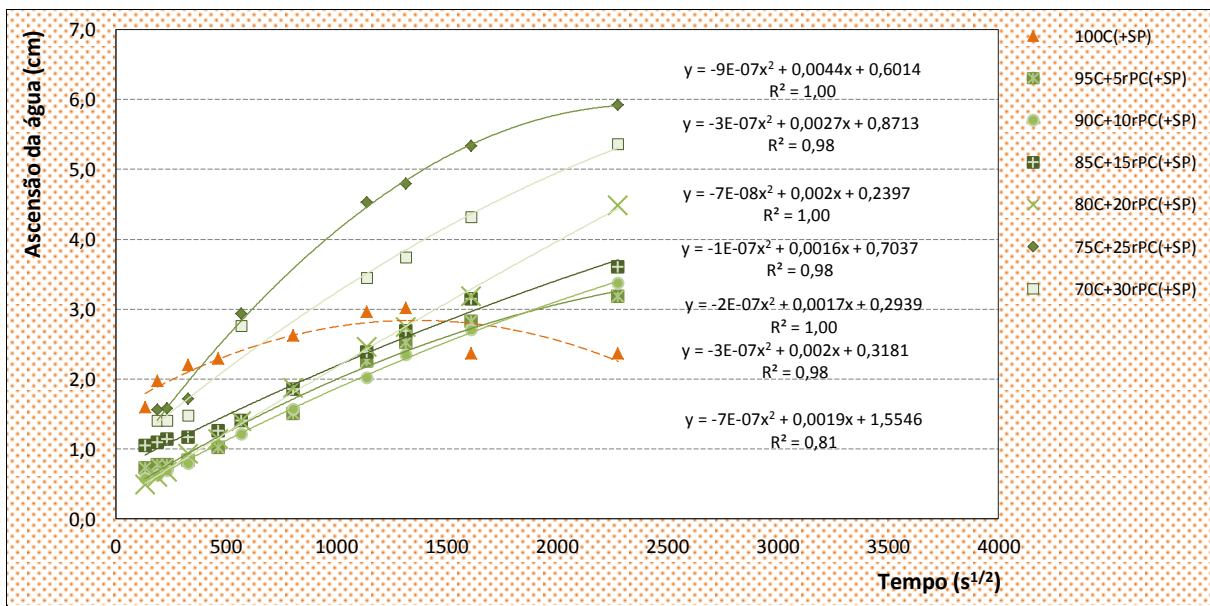


Figura 4.46 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm) determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com diferentes teores de substituição de cimento por resíduo de pedra natural calcária (família das misturas binárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido. A tracejado está representada a linha de tendência para a mistura de referência - 100C(+SP) - cujo ajuste não foi estatisticamente significativo ( $R^2 < 0,70$ )).

Na Figura 4.45 observa-se um aumento da capacidade de absorção de água, à medida que aumenta a incorporação de *filler*. Com a incorporação deste resíduo obtêm-se maiores velocidades de absorção de água nos instantes iniciais comparativamente à mistura de referência (100C(+SP)), traduzida pelos coeficientes de absorção de água por capilaridade superiores.

Relacionando os dados obtidos com os resultados adquiridos no ensaio do estado fresco, constata-se que para as argamassas com teor de ar superior (Figura 4.12) correspondem maiores coeficientes de absorção por capilaridade. Neste caso, verifica-se que, quanto menor a resistência mecânica da argamassa (no caso, para maior percentual de incorporação de resíduo de pedra natural), menor a compacidade, e por conseguinte, coeficientes de absorção de água superiores.

(iii) Observações à família das misturas ternárias:

A Figura 4.47 ilustra os coeficientes de absorção capilar ( $c$ ) para as argamassas da família das misturas ternárias.

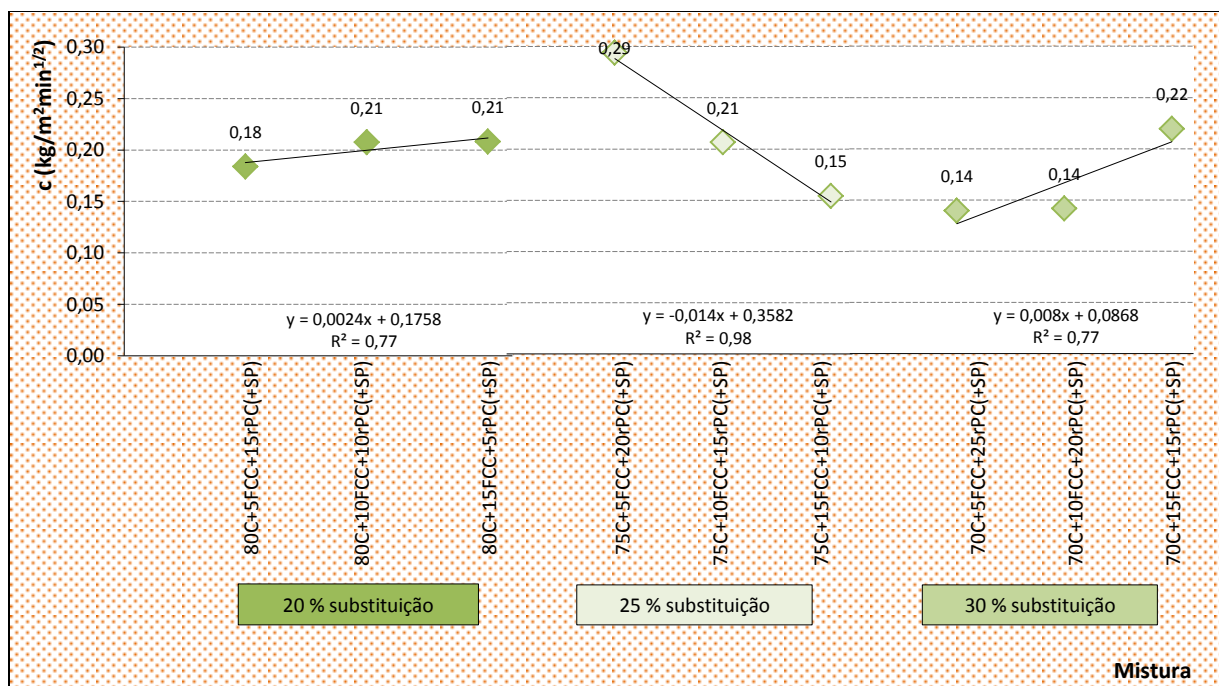


Figura 4.47 - Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{min}^{1/2}$ ) das argamassas da família das misturas ternárias. (As rectas representadas, e as respectivas expressões das equações, correspondem à correlação linear que se verificou entre o coeficiente de capilaridade em função da percentagem de incorporação de resíduos).

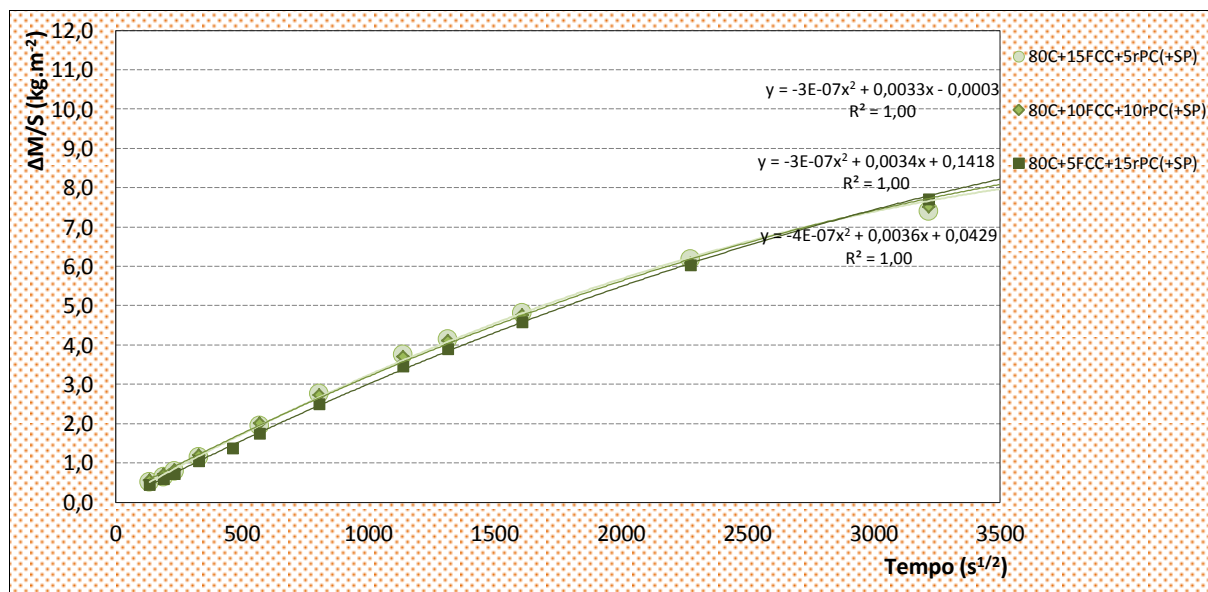


Figura 4.48 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com substituição de 20% de cimento por resíduos sólidos industriais (família de misturas ternárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido).

As Figuras 4.48, 4.50 e 4.52 representam a quantidade de água absorvida por capilaridade com a raiz quadrada do tempo para as misturas com substituição de, respectivamente, 20, 25 e 30% do cimento corrente por resíduos industriais sólidos.

Segundo a observação da Figura 4.48 observa-se um comportamento idêntico para as misturas de cimento estudadas com substituição parcial deste por 20% de resíduos sólidos industriais. Esta apreciação é evidenciada através do andamento da curva de absorção de água das três misturas, ao longo do período de ensaio.

Nas Figuras 4.49, 4.51 e 4.53 ilustram-se as alturas médias de ascensão capilar, observadas nas faces laterais dos provetes ensaiados, nas quais se substituiu, respectivamente, 20, 25 e 30% do cimento por resíduos sólidos industriais.

Apesar de se registarem variações, as misturas ternárias com substituição parcial de 20% de cimento por resíduos com maior incorporação de catalisador exausto da indústria petroquímica (e consecutivamente menor teor de resíduo de pedra natural) apresentam maior ascensão capilar (Figura 4.49). Nas misturas ternárias com incorporação de 20% de resíduos em substituição do cimento corrente, observa-se a partir do valor de coeficiente de absorção capilar, representado na Figura 4.47, velocidades de absorção iniciais superiores para as misturas com percentual (10 e 15%)

de incorporação de resíduo de FCC, sendo a absorção capilar, em ambos os casos, de  $0,21 \text{ kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ .

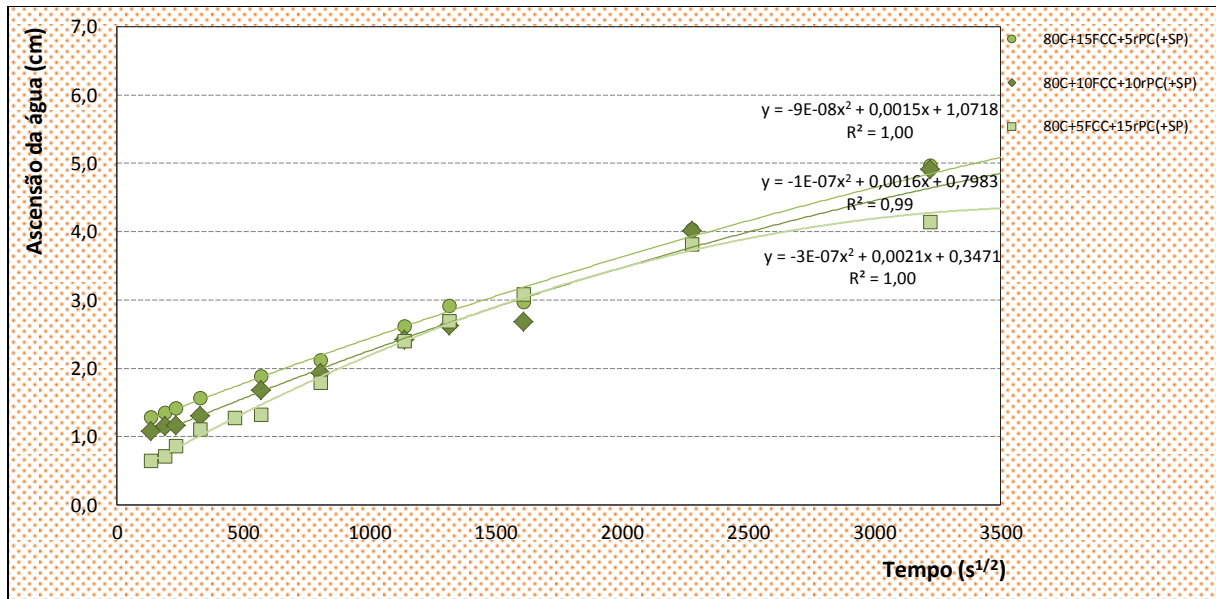


Figura 4.49 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm), determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com substituição de 20% de cimento por resíduos sólidos industriais (família das misturas ternárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido).

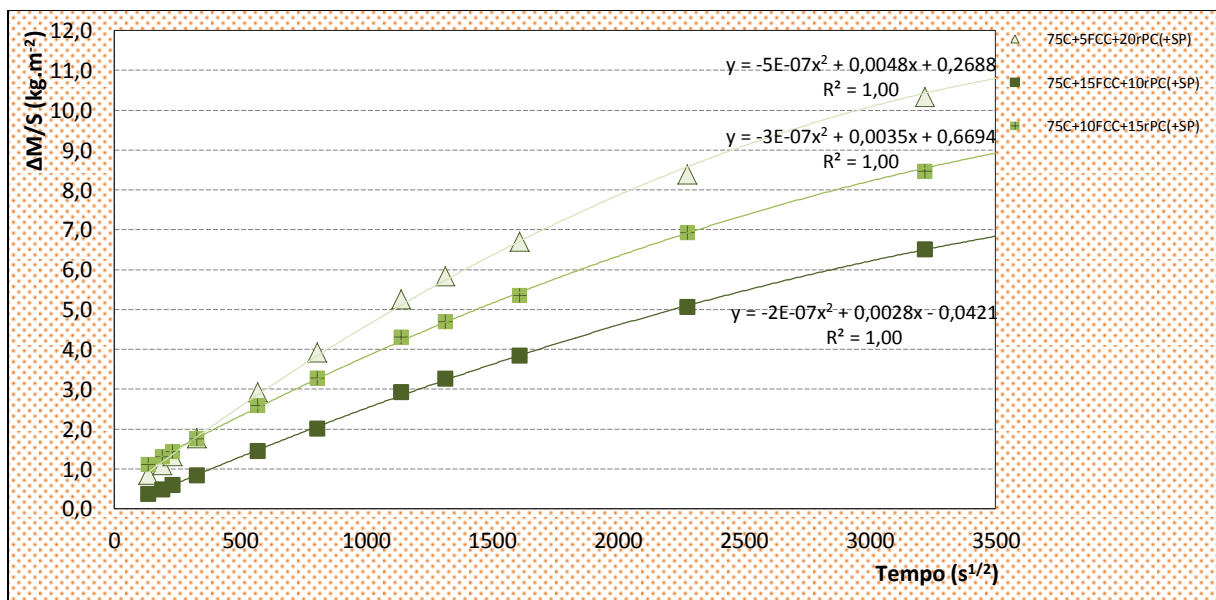


Figura 4.50 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, com substituição de 25% de cimento por resíduos sólidos industriais (família de misturas ternárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido).

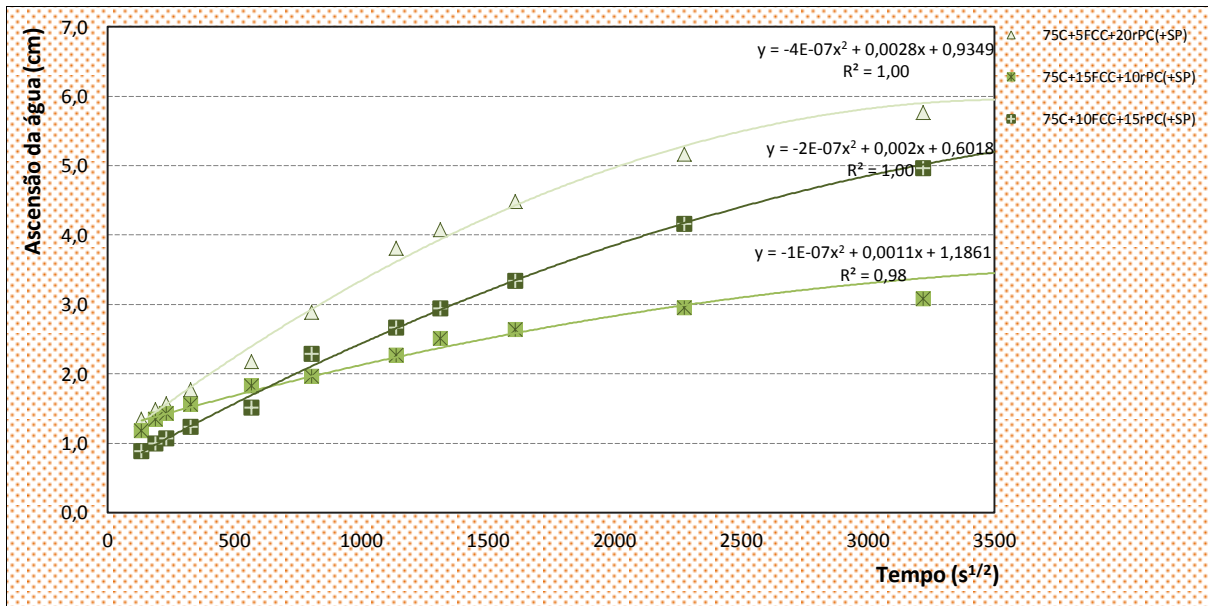


Figura 4.51 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm) determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, com substituição de 25% de cimento por resíduos sólidos industriais (família das misturas ternárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido).

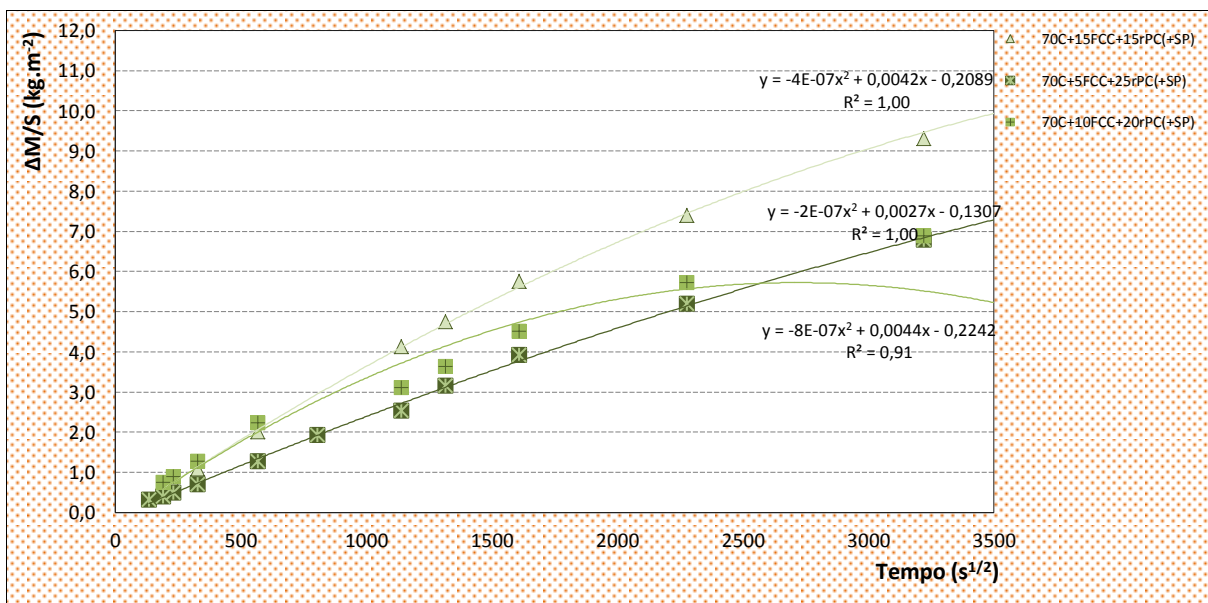


Figura 4.52 - Curva de absorção de água por capilaridade média determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com substituição de 30% de cimento por resíduos sólidos industriais (família de misturas ternárias). (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo decorrido).

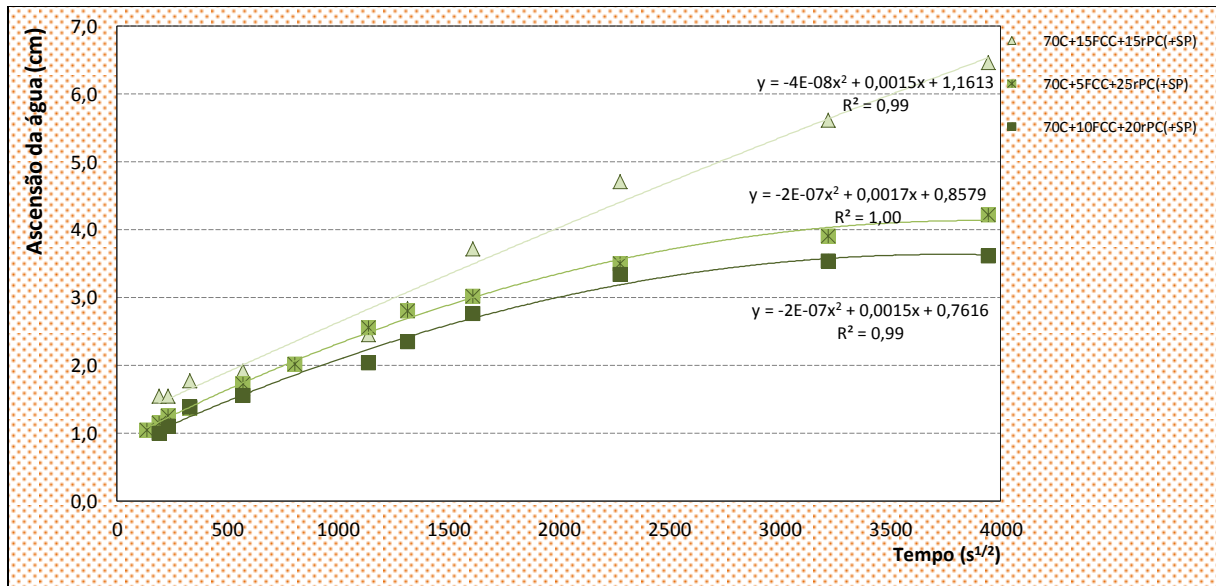


Figura 4.53 - Curva de ascensão da franja líquida média (cm) determinada em provetes prismáticos, ao longo do período de ensaio, nas argamassas com substituição de 30% de cimento por resíduos sólidos industriais (família das misturas ternárias) – estado endurecido. (As rectas representadas, e respectivas expressões das equações, correspondem à correlação polinomial de 2º grau que se verificou entre a altura média de ascensão capilar em função do tempo decorrido).

Pela análise da Figura 4.47, apresentada anteriormente, registam-se coeficientes de absorção superiores para as misturas ternárias com maior teor de resíduo de pedra natural calcária. As misturas ternárias com substituição de 25% de cimento por resíduos industriais sólidos detêm maior capacidade de absorção de água (Figura 4.52) verificada, também, pelo nível médio superior atingido pela água nas faces laterais dos provetes ensaiados (Figura 4.53) nas misturas que apresentam maiores percentagens de incorporação de resíduo de pedra natural (e subsequente redução do teor de resíduo de FCC).

Da análise das representações gráficas acima (Figuras 4.52 e 4.53) observa-se que, as misturas ternárias com substituição de 30% de cimento corrente revelam coeficientes de capilaridade superiores para a mistura com substituição equitativa (em massa) de ambos os resíduos – 70C+15FCC+15rPC(+SP).



## 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste último capítulo são expostas as conclusões gerais, que foram sendo reveladas ao longo do estudo, e referem-se as contribuições do trabalho apresentado face aos objectivos inicialmente propostos. São, também, apresentadas as perspectivas de desenvolvimento futuro neste domínio.

A indústria do cimento em Portugal, e no resto do Mundo, sendo importante para o desenvolvimento da economia, tem como contrapartida o consumo significativo de recursos naturais e de energia, e a emissão de poeiras e outros poluentes, particularmente de CO<sub>2</sub> (Secção 2.2.2). Estes factores representam um problema de cariz ambiental que, cada vez mais, urge solucionar. Uma das medidas possíveis para diminuir o impacte ambiental, associado à produção de cimento, indo também ao encontro das metas que as próprias cimenteiras traçaram de forma a mitigar os impactes ambientais da sua indústria, é substituir parcialmente o cimento por outros produtos cimentícios, que podem ser recursos naturais ou subprodutos de outras indústrias. Na presente dissertação, são objecto de estudo, na qualidade de potenciais substitutos parciais do cimento: o catalisador exausto, oriundo da indústria petrolífera (refinaria de Sines, Petrogal) e o resíduo de pedra natural, proveniente da indústria de transformação de pedra (Porto Mós, GESTIN).

Sob ponto de vista de reactividade química, o catalisador exausto do “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (FCC) é um material cimentício (Secção 2.4.1) e o resíduo de pedra natural, um mineral, com, sobretudo, efeito de *filler* (Secção 2.4.2). Para que estes resíduos possam consagrar-se como substitutos parciais do cimento corrente é necessário provar a viabilidade da utilização do material, eliminando as incertezas sobre o seu comportamento aquando incorporado na produção de novos materiais. Assim se compreende a importância deste trabalho, contribuindo, em simultâneo, para a diminuição do impacte ambiental associado à produção de cimento, minoração da exploração de recursos não-renováveis, mitigação de resíduos sólidos e valorização económica de subprodutos que seriam desprezados. Se a este objectivo se juntar, o facto de, se conseguir melhorar algumas

propriedades do cimento, como acontece no presente estudo, a possibilidade de este produto (cimento com incorporação de resíduos) se tornar viável, num futuro próximo, são ainda maiores.

A norma NP EN 197-1 [1] define a composição, os requisitos (mecânicos, físicos, químicos e de durabilidade), e os critérios de conformidade a que os cimentos correntes devem corresponder. Nos cimentos correntes, incluem-se alguns tipos com incorporação de resíduos (Secção 2.3.1), cuja comercialização no espaço europeu já está prevista. Neste contexto, estudaram-se diferentes misturas de cimentos com incorporação de cada um dos resíduos, objecto de estudo no presente trabalho, bem como, com incorporação de ambos os resíduos, de modo a averiguar, se estas formulações, também, podem corresponder aos requisitos mecânicos e físicos (início de presa), aos quais os cimentos e os seus constituintes devem respeitar para serem certificados pela norma NP EN 197-1 [1].

O desenvolvimento do trabalho experimental consistiu na preparação de pastas e argamassas, que foram ensaiadas no estado fresco e no estado endurecido, para diferentes idades (2, 7, 28, 56 e 90 dias), sendo a variável em análise o(s) teor(es) de resíduo(s) incorporado(s), em substituição do cimento corrente, CEM I 42,5R (CIMPOR).

#### 5.1.1. CONCLUSÕES

(i) Através dos ensaios realizados no estado fresco, salientam-se as seguintes conclusões:

- Nas misturas binárias a introdução de catalisador exausto da indústria petroquímica, em permuta do cimento, aumenta linearmente a necessidade de incorporação de água, enquanto, a incorporação de resíduo de pedra natural tem efeito contrário. Porém, em relação ao tempo – início e fim – de presa, ambos os resíduos (catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural) geram o efeito de acelerador de presa (Secção 4.2.1). As misturas ternárias exibem comportamento idêntico ao verificado nas misturas binárias com substituição parcial do cimento por resíduo de FCC, uma vez que, o aumento do teor de catalisador exausto da indústria petroquímica aumenta a necessidade de adição de água à mistura, para se obter a pasta de consistência normal, e diminui os tempos – início e fim – de presa;
- Todas as pastas comprovam, à luz da norma NP EN 197-1 [1], que a incorporação de resíduos nas misturas não altera a classe de resistência do cimento, 42,5R, uma vez que, todas as misturas apresentam o início de presa após 60 minutos, conforme requerido pela norma;
- No que respeita à consistência das argamassas, torna-se evidente o efeito antagónico da presença dos resíduos estudados, estando estes, em concordância com as necessidades de

adição de água observados pelo ensaio de determinação da pasta de consistência normal. A incorporação de resíduo de FCC confirma a acção de redutor de água, enquanto, a introdução de *filler* aumenta, progressivamente, a trabalhabilidade das argamassas. Evidenciando-se o efeito preponderante do catalisador exausto de FCC;

- Em termos gerais, as misturas de cimento com a incorporação de cada um dos resíduos ou com ambos conduzem a argamassas que apresentam massas volúmicas idênticas, detectando-se, nas misturas ternárias, uma ténue diminuição da massa volúmica à medida que aumenta a percentagem de substituição de cimento por resíduos;
- A substituição parcial de cimento por resíduo(s) industrial(ais) origina argamassas com teor de ar superior. Nas misturas binárias, constata-se que ambos os resíduos contribuem para o aumento do teor de ar, sendo mais evidente o efeito da incorporação de resíduo de pedra natural calcária. Verifica-se que o teor de ar aumenta linearmente com o aumento do resíduo de FCC, detectando-se que a massa volúmica é muito influenciada pelo teor de ar;

(ii) No que se referem às conclusões das propriedades avaliadas no estado endurecido, destacam-se as seguintes:

- Nas misturas binárias, ambos os resíduos traduzem um aumento da resistência à flexão para a mistura com substituição de 5% de cimento, a partir dos 7 dias de hidratação, verificando-se, à medida que aumenta o teor de resíduo, a diminuição das correspondentes resistências, para todos os tempos de hidratação, sendo esta diminuição significativa nas argamassas com substituição de cimento por resíduo de FCC. No que respeita às misturas ternárias, constata-se a diminuição da resistência à flexão para o aumento da percentagem de substituição de cimento por resíduos sólidos industriais;
- É na resistência à compressão que o efeito benéfico da incorporação de FCC se faz sentir, em particular, para o teor de substituição de cimento por este resíduo de 10%, proporcionando ganhos de desempenho, ao longo do período avaliado, em cerca de 60%. Embora as resistências à compressão, nas misturas com substituição de cimento por resíduo de FCC, se revelem penalizadas nas idades jovens, verifica-se, tendencialmente, a evolução da resistência mecânica, ao longo do tempo, que se julga dever-se às características pozolânicas deste material, nomeadamente: as misturas com 5 e 10% de catalisador exausto de FCC recuperam a resistência, da mistura sem resíduos, a partir dos 7 dias de hidratação; e, a mistura com 15% de incorporação recupera a resistência ao fim de 56 dias;
- As misturas binárias com substituição até 15% de resíduo, seja de catalisador exausto seja de resíduo de pedra natural, satisfazem os requisitos mecânicos especificados na norma NP EN

197-1 [1], uma vez que, para a classe de resistência 42,5R, a resistência à compressão aos 2 e aos 28 dias de idade são superiores a 20 e a 42,5 MPa, respectivamente;

- As misturas ternárias com substituição de cimento por 20% de resíduos sólidos industriais estudados não alteram a classe de resistência do cimento, à luz da NP EN 197-1 [1];
- Verifica-se que as argamassas estudadas apresentam coeficientes de ductilidade reduzidos, ou seja, a tensão de rotura à flexão é bastante inferior à compressão;
- A avaliação da resistência mecânica, de forma indirecta, através da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas revelou-se adequada e sensível às variações de resistência registadas, tanto no que se refere a diferenças entre misturas como na evolução da resistência ao longo do desenvolvimento do processo de hidratação;
- Verifica-se o incremento da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas com a evolução do processo de endurecimento;
- Os valores de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, avaliadas em provetes prismáticos, evidenciam que, de um modo geral, as argamassas com substituição de cimento corrente por catalisador exausto da indústria petroquímica são mais compactas e, em último caso, resistentes (sendo esse aumento, particularmente, significativo até percentagem de incorporação de resíduo de FCC até 10%) comparativamente às argamassas das misturas binárias com incorporação de resíduo de pedra natural calcária e às misturas ternárias com substituição parcial de cimento por ambos os resíduos;
- No que diz respeito ao comportamento face à absorção de água por capilaridade observa-se que ambos os resíduos potenciam a capacidade de absorção de água.

**Quadro 5.1 - Quadro-síntese com os valores das propriedades avaliadas no estado fresco, em relação às misturas com incorporação de resíduo(s) que correspondem aos requisitos mecânicos e físicos, impostos pela norma NP EN 197-1 [1], avaliados neste trabalho.**

Família	Mistura	Tempo de Presa			Consistência por espalhamento	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de ar (%)
		Água (g)	t <sub>i</sub> (min)	t <sub>f</sub> (min)	d <sub>m</sub> (mm)		
	95C+5FCC(+SP)	130	264	304	193	2220	5,0
	90C+10FCC(+SP)	136	227	297	175	2160	5,8
<b>Misturas binárias</b>	85C+15FCC(+SP)	142	201	261	161	2130	6,2
	95C+5rPC(+SP)	120	227	307	215	2180	6,9
	90C+10rPC(+SP)	116	216	286	223	2130	8,1
	85C+15rPC(+SP)	113	175	265	219	2110	7,8
	<b>Misturas ternárias</b>	80C+10FCC+10rPC(+SP)	126	165	215	184	2080
	80C+15FCC+5rPC(+SP)	135	175	235	152	2090	8,4

Água - quantidade de água adicionada à mistura para atingir a pasta de consistência normal (g);

t<sub>i</sub> - tempo de início de presa (min);

t<sub>f</sub> - tempo de fim de presa (min);

d<sub>m</sub> - diâmetro médio de espalhamento (mm).

**Quadro 5.2 - Quadro-síntese com os valores das propriedades avaliadas no estado endurecido, em relação às misturas com incorporação de resíduo(s) que correspondem aos requisitos mecânicos e físicos, impostos pela norma NP EN 197-1 [1], avaliados neste trabalho.**

Família	Mistura	v de propagação de ondas U.S. (m/s)					Tensão de rotura à flexão (MPa)					Tensão de rotura à compressão (MPa)					Capilaridade c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )
		2d	7d	28d	56d	90d	2d	7d	28d	56d	90d	2d	7d	28d	56d	90d	
	95C+5FCC(+SP)	3993	4297	4408	4507	--	8,8	12,2	13,6	14,1	15,0	29,1	44,9	59,7	61,3	64,0	0,10
	90C+10FCC(+SP)	3965	4303	4405	4512	4480	8,4	10,3	12,3	11,6	12,0	26,3	48,9	60,2	63,4	65,6	0,16
Misturas binárias	85C+15FCC(+SP)	3650	4033	4345	4423	4465	7,1	8,7	11	12,7	12,7	19,7	33,5	53,8	59,3	64,1	0,18
	95C+5rPC(+SP)	4100	4335	4385	4430	4518	8,2	11,1	12,2	14,3	13,6	27,0	43,8	51,7	53,8	54,8	0,15
	90C+10rPC(+SP)	4162	4315	4414	4450	4433	8,4	10,4	11,5	11,4	11,4	27,3	38,4	45,9	48,8	48,5	0,15
	85C+15rPC(+SP)	4005	4270	4315	4415	4378	7,7	10,0	11,6	12,1	12,3	24,5	38,8	44,3	45,5	46,4	0,17
Misturas ternárias	80C+10FCC+10rPC(+SP)	3775	4140	4315	4263	4373	7,2	8,9	11,0	11,9	10,9	22,7	34,4	44,8	47,9	49,1	0,21
	80C+15FCC+5rPC(+SP)	3738	4122	4199	4265	4333	5,3	9,1	11,2	10,6	11,6	21,0	36,4	50,7	52,0	53,1	0,21

v - velocidade (m/s);

d - dias;

c - coeficiente de capilaridade (kg/m<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>).

Nos Quadros 5.1 e 5.2 apresentam-se os valores das propriedades estudadas no estado fresco e endurecido, respectivamente, correspondentes às formulações, com substituição parcial do cimento por resíduo(s) sólido(s) industrial(ais), que não alteraram a classe de resistência do cimento corrente (CEM I 42,5R) à luz da norma NP EN 197-1.

### 5.1.2. CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO APRESENTADO FACE AOS OBJECTIVOS INICIALMENTE PROPOSTOS

Considera-se que os objectivos estabelecidos, para o desenvolvimento do presente estudo, foram alcançados tendo-se:

- Contribuído para o desenvolvimento de formulações de cimento que visam a diminuição do consumo de cimento, através da substituição deste por dois resíduos industriais;
- Verificado se os cimentos com resíduo(s), também, correspondiam aos requisitos mecânicos e físicos (apenas no respeitante ao tempo de início de presa) a que os cimentos e seus constituintes devem obedecer para serem certificados, e que estão estabelecidos na norma NP EN 197-1 [1];
- Aprofundado o conhecimento do catalisador exausto do “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (FCC), confirmando o seu potencial na qualidade de material cimentício suplementar;
- Avaliado a influência do teor do(s) resíduo(s) no desempenho das pastas e argamassas estudadas;

- Acompanhado a evolução do desempenho da argamassa desde a fase inicial até idades avançadas;
- Verificado a viabilidade de utilização, generalizada, das misturas na construção civil.

## 5.2. PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO

Após o término desta investigação subsistem, ainda, algumas questões que poderão ser esclarecidas através da realização de estudos futuros. Apresentam-se, em seguida, agrupadas segundo fases de desenvolvimento, as perspectivas de trabalho futuro.

(i) Numa primeira fase:

- Aprofundamento do conhecimento das características físicas, químicas e mineralógicas dos resíduos, através da realização de ensaios rigorosos e métodos apropriados;
- Desenvolver a campanha experimental para as formulações de cimento, com substituição parcial deste por resíduo(s), que respeitaram os requisitos avaliados na presente dissertação, averiguando os restantes requisitos e critérios de conformidade definidos pela norma NP EN 197-1 [1].

(ii) Numa segunda fase:

- Determinar o teor óptimo para a aplicação deste produto (cimento com incorporação de resíduos), nomeadamente, verificando o seu comportamento e aptidão em argamassas de assentamento, de reboco e de reparação, de acordo com as respectivas normas;
- Tendo em consideração que uma das condições, para viabilizar o novo produto no mercado, é que o seu preço de venda seja competitivo com a solução técnica já estabelecida, deve-se determinar os custos associados à reutilização de resíduos (transporte, deposição de subprodutos, licenças, entre outros).

(iii) Numa terceira fase:

- Determinar quantitativamente a disponibilidade, a nível nacional e internacional, de resíduos, detectando eventual sazonalidade na produção destes;
- Investigar a variabilidade das fontes de fornecimento de matérias;
- Confirmar a viabilidade técnica do uso destas misturas de cimento com substituição parcial deste pelo(s) resíduo(s) estudado(s);
- Conhecer a resposta do possível mercado, tendo em vista a utilização generalizada do produto.

## LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NP EN 197-1. Abril de 2001, Cimento - Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. [Caparica]: IPQ, 1-35 p.
2. DAMTOFT, J. [et al.]. - Sustainable development and climate change initiatives. 2ª. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, v. 38, 2008. 115-127 p.
3. EUA, World Business Council for Development (WBCSD) - Cement Sustainability Initiative [em linha]. North America: BN, 2002. Disponível em: <[http://www.wbcdcement.org/pdf/agenda\\_summary.pdf](http://www.wbcdcement.org/pdf/agenda_summary.pdf)>. Acesso em: 23 Março. 2010.
4. WORREL, E. [at al.]. - Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. 1ª. ed. [S.l.]: Annual Review of Energy and the Environment, v. 26, 2001. 303-329 p.
5. SCRIVENER, K. [et al.]. - Innovation in use and research on cementitious material. 2ª. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 38, 2008. 128-136 p.
6. PHAIR, J. - Green chemistry for sustainable cement production and use. [S.l.]: Green Chem 8, 2006. 763-780 p.
7. PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. - Fluid catalytic residue (FC3R) - An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures. 29ª. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 1999. 1773-1779 p.
8. TSENG, Y. [et al.]. - The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strenght of cimentitious materials. 11ª. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, v. 29, 2005. 782-787 p.
9. ZORNOZA, E. [et al.]. - Compatibility of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) with various types of cement. 3ª. ed. [S.l.]: Advances in Cement Research, v. 19, 2007. 117-124 p.
10. REIS, R. - Betões Eco-Eficientes com Cinzas Volantes e Matacaulino. Minho: Universidade do Minho, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
11. COUTINHO, J. - Betões eco-eficientes com resíduos. Porto: 1as Jornadas de Materiais na Construção, 2011. 171-214 p.
12. LACASTA, N.; BARATA, P. - O Protocolo de Quioto sobre alterações climáticas: Análise e Perspectivas. [S.l.]: Programa: Clima e Eficiência Energética, 1999. 1-23 p.

13. NATIONS, U. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto: United Nations, 1998. 1-20 p.
14. PORTUGAL, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional - Sistema de Previsão do Cumprimento de Quioto, CumprirQuioto.pt [em linha]. Lisboa: BN, 2011 -. Disponível em: <<http://www.cumprirquioto.pt/quioto/List.action>>. Acesso em: 22 Agosto. 2011.
15. PORTUGAL, Comité Executivo - Estado do cumprimento em alterações climáticas/Documents Publicados, CumprirQuioto.pt [em linha]. Lisboa: BN, 2011-. Disponível em: <<http://www.cumprirquioto.pt/documents/List.action>>. Acesso em: 23 Agosto. 2011.
16. NORWAY, Environmental Knowledge for Change - UNEP/GRID-Arendal/Maps&Graphics [em linha]. AHLENIUS, H. 2007 -. Disponível em: <<http://maps.grida.no/go/graphic/historical-trends-in-carbon-dioxide-concentrations-and-temperature-on-a-geological-and-recent-time-scale>>. Acesso em: 9 Setembro. 2011.
17. TORRAL, F. . J. S. - Eco-eficiência dos Materiais de Construção. [S.l.]: [s.n.], 2010. 47-71 p. n.º 147.
18. WBCSD. Rumo a uma Indústria Cimenteira Sustentável. [S.l.]: Battelle Memorial Institute, 2002. 2-7 p. ISBN 2-240940-36-1.
19. WBCSD. - The Global Cement Report. 9ª. ed. Reino Unido: International Cement Review, 2011. 1-400 p.
20. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Cement roadmap targets 2010. [S.l.]: OECD/IEA and The World Business Council for Sustainable Development, 2009.
21. COUTINHO, J. Materiais de Construção 2. Porto: Universidade do Porto - Departamento de Engenharia Civil, 2002 (actualizado em 2006). 36-137 p.
22. PORTUGAL, CIMPOR - Grupo/Produção de Cimento [em linha]. Lisboa: BN, 2011-. Disponível em: <<http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?cntx=7ZHUaMzZaU07mXxT4QpqRRZo54vLI3qTPVA6zyf5n2jl6HkxkEv7Mh%2BttytiAow>>. Acesso em: 4 Julho. 2011.
23. PORTUGAL, SECIL - O que fazemos/Cimento/Processo de Produção [em linha]. Lisboa: BN, 2011-. Disponível em: <[http://www.secil.pt/default.asp?pag=proc\\_fabrico](http://www.secil.pt/default.asp?pag=proc_fabrico)>. Acesso em: 4 Julho. 2011.
24. CIMPOR, CIMENTOS DE PORTUGAL, SGPS, S.A. Relatório de Sustentabilidade '09. Lisboa: [s.n.], 2010. 1-161 p.

25. WORRELL, E. [et al.]. - Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. 1ª. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 26, 2001. 303-329. p.
26. USA, World Business Council for Sustainable Development, International Energy Agency - Home/By Topic/Technology Roadmaps [em linha]. North America: BN, 2009-. Disponível em: <[http://www.iea.org/papers/2009/Cement\\_Roadmap.pdf](http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap.pdf)>. Acesso em: 9 Setembro. 2011.
27. GALLY, C. Desenvolvimento de materiais cimentícios de baixo impacto ambiental contendo resíduo catalítico gerado em refinaria de petróleo. Brasil, Salvador: Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica, 2010. 1-31 p. Dissertação de Mestrado de Engenharia Ambiental Urbana.
28. CIMPOR TEC. PORTUGAL, Instalação e valorização energética de resíduos sólidos em Souselas. Souselas: Assessoria para o desenvolvimento sustentável, 2009.
29. VIEIRA, J. - Interacção cimento-superplastificante - Avaliação da estabilidade do comportamento. Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
30. COSTA, C.; CARVALHO, P. Engenharia - Microestrutura dos materiais, Pequeno grande mundo dos cimentos. [S.l.]: Revista Profissional de Construção - Arte&Construção, Julho 2009. 32-36 p.
31. HEWLETT, P. - Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4ª. ed. [S.l.]: Elsevier. ISBN 070662565.
32. PORTUGAL, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia - Apoio às Aulas/Materiais de Construção 2 [em linha]. Porto: BN, 2006. Disponível em: <<http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano3/mc2/Aulas/Aula8.pdf>>. Acesso em: 24 Julho. 2011.
33. NP EN 206-1. Junho de 2007, Betão - Especificação, desempenho, produção e conformidade. 2ª. ed. [Caparica]: IPQ, 4-84 p.
34. TORGAL, F.; JALALI, S. O Futuro da Indústria do Betão Pronto, nº 26. Lisboa: [s.n.], Abril 2011. 22-27 p.
35. COUTINHO, J. - The combined benefits of CPF and RHA in improving durability of concrete structures. [S.l.]: Elsevier, v. 25, 2003. 51-59 p.
36. SIDDIQUE, R. - Waste Materials and By-Products in Concrete - Cement Kiln Dust. [S.l.]: [s.n.], 2008. 351-378 p.
37. GARCÍA, R. [et al.]. - The pozzolanic properties of paper sludge waste. 22(7). ed. [S.l.]:

Construction and Building Materials, 2008. 1484-1490 p.

38. PORTUGAL, Galp Energia - Pesquisa/Fundamentos de Refinação [em linha]. Lisboa: BN, 2010-. Disponível em: <<http://www.galpennergia.com/PT/investidor/ConhecerGalpEnergia/Os-nossos-negocios/Refinacao-Distribuicao/ARL/Refinacao/Paginas/Didatico-Refinacao.aspx>>. Acesso em: 11 Julho. 2011.
39. PORTUGAL, Galp Energia - Glossário/Fluid catalytic cracking (FCC) -. Disponível em: <<http://www.galpennergia.com/PT/Paginas/Glossario.aspx?Letter=F>>. Acesso em: 11 Julho. 2011.
40. PORTUGAL, Google docs - Mecanismo de Reacções Catalíticas Heterogéneas, HENRIQUES, C. [em linha]. Lisboa: BN, 2010 -, 13 Junho 2011. Disponível em: <Google docs>. Acesso em: 5 Setembro. 2011.
41. PORTUGAL, SECIL - O que fazemos/Cimento/Histórico do Cimento [em linha]. Lisboa: BN, 2011-. Disponível em: <[http://www.secil.pt/default.asp?pag=historico\\_cimento](http://www.secil.pt/default.asp?pag=historico_cimento)>. Acesso em: 10 Setembro. 2011.
42. PACEWSKA, B.; WILINSKA, I.; KUBISSA, J. - Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive. 322<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Thermochemica acta, 1998. 175-181 p.
43. SU, N. [A. ]. - Reuse of waste catalyst from petrochemical industries for cement substitution. 30. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2000. 1773-1783 p.
44. PACEWSKA, B. [et al.]. - Effect of waste aluminosilicate material on cement hydration and properties of cement mortars. 32(11). ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2002. 1823-1830 p.
45. PERRAKI, T. [et al.]. - The effect of zeolite on the proprieties and hydratation of blended cements. 32<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Cement&Concrete Composies, 2010. 128-133 p.
46. PACEWSKA, B. [et al.]. - Modification of the properties of concrete by a new pozzolan - A waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed. 32<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2002. 145-152 p.
47. PAYÁ, J. [et al.]. - Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes. 33<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2003. 603-609 p.
48. PINTO, C.; BUCHLER, P.; DWECK, J. - Pozzolanic proprieties of a residual FCC catalyst during the

- early stages of cement hydration - Evaluation by thermal analysis. [S.l.]: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 87, 2007. 715-720 p.
49. DWECK, J.; PINTO, C.; BUCHLER, P. - Study of a brazilian spent catalyst as cement aggregate by thermal and mechanical analysis. [S.l.]: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 92(1), 2008. 121-127 p.
50. PINTO, C.; BUCHLER, P.; DWECK, J. - Pozzolanic proprieties of a residual FCC catalyst during the early stages of cement hydration - Evaluation by thermal analysis. [S.l.]: Journal of a Thermal Analysis and Calorimetry, v. 87, 2007. 715 p.
51. TROCHEZ, J.; AGREDO, J.; GUTIÉRREZ, R. Estudio de la hidratación de pastas de cemento adicionadas con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) de una refinería colombiana. [S.l.]: Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, v. 55, 2010. 26-34 p.
52. WU, J.; WU, W.; HSU, K. - The effect of waste oil-cracking catalyst on the compressive strength of cement pastes and mortars. 33. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2003. 245-253 p.
53. PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. Physical, chemical and mechanical proprieties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements. 31. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2001. 57-61 p.
54. HSU, K. [et al.]. - Oil cracking waste catalyst as an active pozzolanic material for superplasticized mortars. 31ª. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2001. 1815-1820 p.
55. ANTIOHOS, S.; CHOULIARA, E.; TSIMAS, S. - Reuse of spent catalyst from oil-cracking refineries as supplementary cementing material. 2ª. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 4, 2006. 73-76 p.
56. REIS, A.; TRISTÃO, F. - Análise de argamassas com resíduo de corte de rochas ornamentais. Vitória, Espírito Santo: Universidade Federal do Espírito Santo.
57. NUNES, R. [et al.].- Reciclagem de resíduos de granito para uso na indústria de revestimentos cerâmicos. 46ª. ed. [S.l.]: [s.n.].
58. WBCSD. - The Global Cement Report. 8ª. ed. [S.l.]: International Cement Review, Abril 2009. 1-400. p.
59. MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, V.; IRASSAR, E. F. - Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. 25ª. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2003. 61-67 p.

60. TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. 2ª. ed. Cement Chemistry: Academic Press, 1998. 1-475 p. ISBN 012683900X.
61. HAWKINS, P.; TENNIS, P.; DETWILER, R. - The Use of Limestone on Portland Cement: A state-of-the-Art Review. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association, 2003. 1-44 p. ISBN 0-89312-229-7. Engineering Bulletin 227.
62. HOOTON, R.; NOKKEN, M.; THOMAS, M. Portlan-Limestone Cement: State-of-the-Art Report and Gap Analysis for CSA A 3000. Ottawa, Ontario, Canada: Cement Association of Canada, 2007. 1-59 p. ISBN 3053.
63. CALMON, J. [et al.]. - Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. Salvador, Bahia: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, v. II, 1997. 64-75 p.
64. MOURA, W.; GONÇALVES, J.; LEITE, R. - Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. 26ª. ed. [S.l.]: Feira de Santana, jan./jun.2002. 49-61 p.
65. GHRICI, M.; KENAI, S.; SAID-MANSOUR, M. Mechanical proprieties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. 29ª. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2007. 542-549 p.
66. DE WEERDT, K. [et al.]. - Hydratation mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2010. 1-13 p.
67. DE WEERDT, K. [et al.].- Synergy between fly ash and limestone powdre in ternary cements. 33. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Composites, 2011. 30-38 p.
68. ELKHADIRI, I. [et al.].- Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in Moroccan Portland cement. 32. ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2001. 1597-1603 p.
69. NP EN 196-1. Outubro 2006, Métodos de ensaio de cimentos - Determinação das resistências mecânicas. 3ª. ed. [Caparica]: IPQ, 1-37 p.
70. COSTA, C. J. . M.; FERREIRA, P.; CARVALHO, P. A. Microstructural Analysis of Cement Pastes Blended With Waste Catalysts from Oil Refinery. Glasgow, UK.: European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes , 2009.

71. NP EN 196-3. Outubro 2006, Métodos de ensaio de cimentos - Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. 3ª. ed. [Caparica]: IPQ, 5-17 p.
72. RODRIGUES, M. - Argamassas de revestimentos para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência de ligantes. Portugal, Lisboa: Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2004. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil - especialidade de reabilitação do património edificado.
73. EN 1015-3. Fevereiro 1999, Methods of test mortar of masonry - Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). [Brussels]: European Committee for Standardization (CEN), 2-9 p.
74. RESENDE, N. - Avaliação do desempenho de argamassas de reparação para betão armado. Portugal, Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2007. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil.
75. EN 1015-6. 1998, Methods of test for mortar for masonry - Determination of bulk density of fresh mortar. [Brussels]: European Committee for standarddization (CEN).
76. EN 1015-7. Outubro, Methods od test for mortar for masonry - Determination of air content of fresh mortar. [Brussels]: European Committee for Standardization (CEN).
77. BERALDO, A.; VIEIRA, F. Ensaios não destrutivos (END) aplicados a argamassas com adição de fibra de sisal. Brasil, Rio de Janeiro: [s.n.], Junho 2003.
78. ASTM C569-09. 2010, Standard Test Method for Pulse Velocity Through concrete. [EUA]: American Society for Testing and Materials International, 1-4 p.
79. EN 1015-18. Dezembro 2002, Methods of test for mortar masonry - Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. [Brussels]: European committee for standardization (CEN), 3-8 p.
80. E393. Maio 1993, Betões - Determinação da absorção de água por capilaridade. [Portugal]: Documentação Normativa - Especificação LNEC, 1-2 p. ISBN 0870-8592.
81. AGOSTINHO, A. - Estudo da evolução do desempenhono tempo de argamassas de cal aérea. Portugal, Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Abril 2008. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.
82. BRAGA, M. - Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão - Efeito de filler e pozolânico. Portugal, Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade

Técnica de Lisboa, Novembro 2010. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

83. ASTM C311-07. 2007, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland - Cement Concrete. [EUA]: American Society for Testing and Materials International, 1-10 p.
84. DAMTOFT, J. [ A. ]. Sustainable development and climate change initiatives. Cement and Concrete Research, 2008. 115-127.
85. TAVARES, M. [et al.]- Métodos de diagnóstico para revestimientos de edificios antiguos. Importancia y aplicabilidad de los ensayos in situ. [S.l.]: [s.n.], Abril 2005.

## **ANEXOS**



## **ANEXO A – PLANEAMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL**

A.1 – CALENDARIZAÇÃO DAS ACTIVIDADES

A.2 – DESCRIÇÃO E PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DAS ACTIVIDADES



## A.1 – CALENDARIZAÇÃO DAS ACTIVIDADES

Trabalho Final de Mestrado - Planeamento

Abr de 2011 (Lisboa)

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
28	29	30	31	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
		11:17 - 100C 12:30 - 100C 13:30 - PARAPEDRA 17:43 - 85C+15FCC 19:35 - 85C+15FCC	11:25 - 100C 12:35 - 100C 17:43 - 85C+15FCC 19:35 - 85C+15FCC	12:30 - 100C 17:43 - 85C+15FCC		
25	26	27	28	29	30	1
08:50 - 100C(+SP) 09:52 - 100C(+SP) 11:06 - 95C+5FCC 12:00 - 95C+5FCC	09:05 - 100C(+SP) 09:52 - 100C(+SP) 11:20 - 95C+5FCC 12:00 - 95C+5FCC 15:14 - 90C+10FCC 16:30 - 90C+10FCC 17:55 - 95C+5WM 19:10 - 95C+5WM	07:30 - 100C(+SP) 10:30 - 95C+5FCC 11:50 - 90C+10WM 13:00 - 90C+10WM 15:14 - 90C+10FCC 16:00 - 85C+15WM 16:30 - 90C+10FCC 17:00 - 100C 17:05 - 85C+15WM 17:43 - 85C+15FCC 17:55 - 95C+5WM 19:10 - 95C+5WM	09:30 - 90C+10FCC 11:30 - 90C+10WM 12:00 - 90C+10WM 12:30 - 95C+5WM 14:00 - 80C+20WM 15:00 - 80C+20WM 16:00 - 85C+15WM 16:30 - 85C+15WM 17:00 - 80C+5FCC+15W 18:00 - 80C+5FCC+15W	11:30 - 90C+10WM 13:30 - 80C+20WM 14:00 - 80C+20WM 14:30 - 85C+15WM 17:00 - 80C+5FCC+15W 18:00 - 80C+5FCC+15W	14:00 - 80C+20WM 17:00 - 80C+5FCC+15W	

Trabalho Final de Mestrado - Planeamento

Mai de 2011 (Lisboa)

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
25	26	27	28	29	30	1
08:50 - 100C(+SP) 09:52 - 100C(+SP) 11:06 - 95C+5FCC 12:00 - 95C+5FCC	09:05 - 100C(+SP) 09:52 - 100C(+SP) 11:20 - 95C+5FCC 12:00 - 95C+5FCC 15:14 - 90C+10FCC 16:30 - 90C+10FCC 17:55 - 95C+5WM 19:10 - 95C+5WM	07:30 - 100C(+SP) 10:30 - 95C+5FCC 11:50 - 90C+10WM 13:00 - 90C+10WM 15:14 - 90C+10FCC 16:00 - 85C+15WM 16:30 - 90C+10FCC 17:00 - 100C 17:05 - 85C+15WM 17:43 - 85C+15FCC 17:55 - 95C+5WM 19:10 - 95C+5WM	09:30 - 90C+10FCC 11:30 - 90C+10WM 12:00 - 90C+10WM 12:30 - 95C+5WM 14:00 - 80C+20WM 15:00 - 80C+20WM 16:00 - 85C+15WM 16:30 - 85C+15WM 17:00 - 80C+5FCC+15W 18:00 - 80C+5FCC+15W	11:30 - 90C+10WM 13:30 - 80C+20WM 14:00 - 80C+20WM 14:30 - 85C+15WM 17:00 - 80C+5FCC+15W 18:00 - 80C+5FCC+15W	14:00 - 80C+20WM 17:00 - 80C+5FCC+15W	
2	3	4	5	6	7	8
08:40 - 80C+10FCC+10 09:55 - 80C+10FCC+10 10:00 - 100C(+SP) 12:15 - 80C+15FCC+5W 13:00 - 95C+5FCC 14:15 - 80C+15FCC+5W	08:30 - 80C+10FCC+10 08:40 - 80C+10FCC+10 09:00 - 90C+10FCC 10:00 - 75C+5FCC+20W 11:00 - 75C+5FCC+20W 12:00 - 80C+15FCC+5W 12:30 - 80C+15FCC+5W 13:00 - 75C+10FCC+15 14:00 - 75C+10FCC+15 15:00 - 95C+5WM	08:00 - 80C+10FCC+10 10:00 - 75C+5FCC+20W 10:30 - 75C+5FCC+20W 11:00 - 80C+15FCC+5W 12:00 - 75C+15FCC+10 13:00 - 75C+15FCC+10 14:00 - 75C+10FCC+15 14:30 - 75C+10FCC+15 15:00 - 70C+5FCC+25W 16:00 - 70C+5FCC+25W 17:00 - 90C+10WM 19:00 - 85C+15WM	09:30 - 75C+5FCC+20W 11:30 - 75C+15FCC+10 12:00 - 75C+15FCC+10 12:30 - 75C+10FCC+15 14:00 - 70C+10FCC+20 15:00 - 70C+10FCC+20 16:00 - 70C+5FCC+25W 16:30 - 70C+5FCC+25W 17:00 - 70C+15FCC+15 18:00 - 70C+15FCC+15 19:00 - 80C+20WM 20:30 - 80C+5FCC+15W	11:30 - 75C+15FCC+10 13:00 - 70C+10FCC+20 13:30 - 70C+10FCC+20 14:00 - 70C+5FCC+25W 16:00 - 75C+25WM 17:00 - 75C+25WM 18:00 - 70C+15FCC+15 18:30 - 70C+15FCC+15 19:00 - 70C+30WM 20:00 - 70C+30WM 21:30 - 90C+10WM (R1)	00:00 - 75C+10FCC+15 14:00 - 70C+10FCC+20 16:00 - 75C+25WM 16:30 - 75C+25WM 17:00 - 70C+15FCC+15 19:00 - 70C+30WM 19:30 - 70C+30WM 23:00 - 90C+10WM(R1)	00:30 - 75C+10FCC+15 16:00 - 75C+25WM 19:00 - 70C+30WM 23:00 - 90C+10WM(R1)
9	10	11	12	13	14	15
00:30 - 75C+10FCC+15 08:00 - 80C+10FCC+10 11:00 - 80C+15FCC+5W	10:00 - 75C+5FCC+20W 13:00 - 75C+10FCC+15	12:00 - 75C+15FCC+10 15:00 - 70C+5FCC+25W	14:00 - 70C+10FCC+20 17:00 - 70C+15FCC+15	16:00 - 75C+25WM 19:00 - 70C+30WM 23:00 - 90C+10WM(R1)	00:30 - 75C+10FCC+15	
16	17	18	19	20	21	22
11:00 - 90C+10FCC 12:00 - 95C+5WM	11:00 - 90C+10WM 12:00 - 85C+15WM	11:15 - 100C 11:20 - 100C 13:20 - 100C 15:30 - 100C 15:30 - 100C(+SP) 17:43 - 85C+15FCC 19:35 - 85C+15FCC 19:40 - 85C+15FCC	08:00 - 95C+5FCC 10:00 - 90C+10FCC 11:00 - 80C+20WM 12:30 - 95C+5WM 13:00 - 85C+15FCC	08:00 - 80C+20WM 08:00 - 85C+15WM 09:00 - 75C+25WM 11:00 - 70C+30WM 12:30 - 90C+10WM		
23	24	25	26	27	28	29
07:30 - 100C(+SP) 09:30 - 100C(+SP) 09:35 - 100C(+SP) 11:30 - 95C+5FCC 13:30 - 95C+5FCC 13:35 - 95C+5FCC	09:00 - 90C+10FCC 11:00 - 90C+10FCC 11:05 - 90C+10FCC 13:00 - 95C+5WM 15:00 - 95C+5WM 15:05 - 95C+5WM	11:00 - 90C+10WM 13:00 - 90C+10WM 13:05 - 90C+10WM 15:00 - 85C+15WM 15:05 - 85C+15WM 17:00 - 85C+15WM	13:00 - 80C+20WM 15:00 - 80C+20WM 15:05 - 80C+20WM 17:05 - 80C+5FCC+15W 19:00 - 80C+5FCC+15W 21:00 - 80C+5FCC+15W	08:00 - 80C+5FCC+15W 14:00 - 80C+15FCC+5W	08:00 - 75C+5FCC+20W 13:00 - 80C+10FCC+10 13:00 - 75C+15FCC+10	10:30 - 70C+5FCC+25W 12:00 - 70C+10FCC+20 15:00 - 70C+15FCC+15
30	31	1	2	3	4	5
07:30 - 80C+10FCC+10 09:30 - 80C+10FCC+10 09:35 - 80C+10FCC+10 11:30 - 80C+15FCC+5W 13:30 - 80C+15FCC+5W 13:35 - 80C+15FCC+5W	09:00 - 75C+5FCC+20W 11:00 - 75C+5FCC+20W 11:05 - 75C+5FCC+20W 13:00 - 75C+10FCC+15 15:00 - 75C+10FCC+15 15:05 - 75C+10FCC+15	11:17 - 100C 11:30 - 75C+15FCC+10 13:30 - 75C+15FCC+10 13:35 - 75C+15FCC+10 15:30 - 70C+5FCC+25W 17:30 - 70C+5FCC+25W 19:30 - 70C+5FCC+25W 19:35 - 85C+15FCC	13:00 - 70C+10FCC+20 15:00 - 70C+10FCC+20 15:05 - 70C+10FCC+20 17:00 - 70C+15FCC+15 19:00 - 70C+15FCC+15 19:05 - 70C+15FCC+15	15:00 - 75C+25WM 17:00 - 75C+25WM 17:05 - 75C+25WM 19:00 - 70C+30WM 21:00 - 70C+30WM 21:05 - 70C+30WM 23:00 - 90C+10WM	00:00 - 75C+10FCC+15	

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
30	31	1	2	3	4	5
07:30 - 80C+10FCC+10 09:30 - 80C+10FCC+10 09:35 - 80C+10FCC+10 11:30 - 80C+15FCC+5W 13:30 - 80C+15FCC+5W 13:35 - 80C+15FCC+5W	09:00 - 75C+5FCC+20W 11:00 - 75C+5FCC+20W 11:05 - 75C+5FCC+20W 13:00 - 75C+10FCC+15 15:00 - 75C+10FCC+15 15:05 - 75C+10FCC+15	11:17 - 100C 11:30 - 75C+15FCC+10 13:30 - 75C+15FCC+10 13:35 - 75C+15FCC+10 15:30 - 70C+5FCC+25W 17:30 - 70C+5FCC+25W 19:30 - 70C+5FCC+25W 19:35 - 85C+15FCC	13:00 - 70C+10FCC+20 15:00 - 70C+10FCC+20 15:05 - 70C+10FCC+20 17:00 - 70C+15FCC+15 19:00 - 70C+15FCC+15 19:05 - 70C+15FCC+15	15:00 - 75C+25WM 17:00 - 75C+25WM 17:05 - 75C+25WM 19:00 - 70C+30WM 21:00 - 70C+30WM 21:05 - 70C+30WM 23:00 - 90C+10WM	00:00 - 75C+10FCC+15	
6	7	8	9	10	11	12
07:00 - 100C(V2) 07:30 - 100C(V2) 09:00 - 100C(+SP) 09:30 - 100C(CEN) (V2) 10:30 - 100C(CEN) (V2) 12:00 - 95C+5FCC 13:00 - 85C+15FCC (V2) 14:30 - 85C+15FCC(V2)	11:00 - 90C+10FCC 11:30 - 100C(CEN) (R2) 14:00 - 95C+5WM 14:30 - 100C(V2) 16:00 - 85C+15FCC(V2)	08:00 - 100C(CEN) (V2) 10:00 - 100C(V2) 13:00 - 90C+10WM 16:00 - 85C+15WM 17:30 - 85C+15FCC(V2)	15:00 - 80C+20WM 18:00 - 85C+5FCC+15W			
13	14	15	16	17	18	19
08:00 - 100C(CEN) (V2) 09:00 - 80C+10FCC+10 10:00 - 100C(V2) 12:00 - 80C+15FCC+5W 16:30 - 85C+15FCC (V2)	11:00 - 75C+5FCC+20W 14:00 - 75C+10FCC+15	12:25 - 75C+15FCC+10 12:30 - 100C 16:00 - 70C+5FCC+25W 18:30 - 85C+15FCC	15:00 - 70C+10FCC+20 18:00 - 70C+15FCC+15	17:00 - 75C+25WM 20:00 - 70C+30WM		
20	21	22	23	24	25	26
09:00 - 100C(+SP) 12:00 - 95C+5FCC	11:00 - 90C+10FCC 14:00 - 95C+5WM	13:00 - 90C+10WM 16:00 - 85C+15WM	15:00 - 80C+20WM 18:00 - 85C+5FCC+15W			
27	28	29	30	1	2	3
09:00 - 80C+10FCC+10 12:00 - 80C+15FCC+5W	11:00 - 75C+5FCC+20W 14:00 - 75C+10FCC+15	13:00 - 75C+15FCC+10 16:00 - 70C+5FCC+25W	15:00 - 70C+10FCC+20 18:00 - 70C+15FCC+15	17:00 - 75C+25WM 20:00 - 70C+30WM		

Trabalho Final de Mestrado - Planeamento

Jul de 2011 (Lisboa)

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
27 09:00 - 80C+10FCC+10 12:00 - 80C+15FCC+5W	28 11:00 - 75C+5FCC+20W 14:00 - 75C+10FCC+15	29 13:00 - 75C+15FCC+10 16:00 - 70C+5FCC+25W	30 15:00 - 70C+10FCC+20 18:00 - 70C+15FCC+15	1 17:00 - 75C+25WM 20:00 - 70C+30WM	2	3
4 08:00 - 100C(CEN) (V2) 10:00 - 100C(V2) 17:00 - 85C+15FCC(V2)	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18 08:00 - 100C(CEN) (V2) 10:00 - 100C(V2) 17:00 - 85C+15FCC(V2)	19 09:00 - 95C+5FCC(V2) 11:17 - 100C 18:30 - 85C+15FCC	20 08:00 - 95C+5FCC(V2)	21 08:30 - 95C+5FCC(V2)	22	23	24 09:00 - 100C(+SP) 12:00 - 95C+5FCC
25 11:00 - 90C+10FCC 14:00 - 95C+5WM	26 08:30 - 95C+5FCC(V2) 13:00 - 90C+10WM 16:00 - 85C+15WM	27 15:00 - 80C+20WM 18:00 - 85C+5FCC+15W	28	29	30	31 09:00 - 80C+10FCC+10 12:00 - 80C+15FCC+5W

Trabalho Final de Mestrado - Planeamento

Ago de 2011 (Lisboa)

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
1 08:00 - 100C(CEN) (V2) 09:30 - 100C(V2) 11:00 - 75C+5FCC+20W 14:00 - 75C+10FCC+15 17:00 - 85C+15FCC(V2)	2 13:00 - 75C+15FCC+10 16:00 - 70C+5FCC+25W	3 15:00 - 70C+10FCC+20 18:00 - 70C+15FCC+15	4 17:00 - 75C+25WM 20:00 - 70C+30WM	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16 09:00 - 95C+5FCC(V2)	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	1	2	3	4 09:00 - 100C(CEN) (V2) 10:30 - 100C(V2) 12:00 - 85C+15FCC(V2)

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
29	30	31	1	2	3	4 09:00 - 100C(CEN) (V2) 10:30 - 100C(V2) 12:00 - 85C+15FCC(V2)
5	6	7	8	9	10	11 95C+5FCC(V2)
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	1	2

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
26	27	28	29	30	1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15 09:00 - 95C+5FCC (V2)	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31	1	2	3	4	5	6

## A.2 – DESCRIÇÃO E PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DAS ACTIVIDADES

### Qua 20 de Abr de 2011

11:17 100C

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1800g C);

12:30 100C

Descrição: -2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1800g C)

13:30 PARAPEDRA

Descrição: Rio Maior - Parapedra Areia S90/100

17:43 85C+15FCC

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1530g C+270g FCC)

19:35 85C+15FCC

Descrição: -2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1530g C+270g FCC)

### Qui 21 de Abr de 2011

11:25 100C

Descrição: Desmoldagem 1ª Amassadura

12:35 100C

Descrição: Desmoldagem 2ª Amassadura

17:43 85C+15FCC

Descrição: Desmoldagem 1ª Amassadura

19:35 85C+15FCC

Descrição: Desmoldagem 2ª Amassadura

### Sex 22 de Abr de 2011

12:30 100C

Descrição: -Ensaio de ultra-sons (2d); -Ensaio de Resistência à Flexão (2d); -Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d).

17:43 85C+15FCC

Descrição: -Ensaio de ultra-sons (2d); -Ensaio de Resistência à Flexão (2d); -Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d).

### Seg 25 de Abr de 2011

08:50 100C(+SP)

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1800g C)

09:52 100C(+SP)

Descrição: -2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1800g C)

11:06 95C+5FCC

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1710g C+90g FCC)

12:00 95C+5FCC

Descrição: -2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1710g C+90g FCC)

### Ter 26 de Abr de 2011

09:05 100C(+SP)

Descrição: -Desmoldagem 1ª Amassadura

09:52 100C(+SP)

Descrição: -Desmoldagem 2ª Amassadura

11:20 95C+5FCC

Descrição: Desmoldagem 1ª Amassadura

12:00 95C+5FCC

Descrição: Desmoldagem 2ª Amassadura

**15:14 90C+10FCC**  
| Descrição: -1ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1620g C+180g FCC)

**16:30 90C+10FCC**  
| Descrição: -2ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1620g C+180g FCC)

**17:55 95C+5WM**  
| Descrição: -1ªAmassadura de 4 doses (Receita:1710g C+90g WM)

**19:10 95C+5WM**  
| Descrição: -2ªAmassadura de 4 doses (Receita:1710g C+90g WM)

#### Qua 27 de Abr de 2011

**07:30 100C(+SP)**  
| Descrição:  
(tolerância: 30min. hora do ensaio: 8h50) -Ensaio de ultra-sons (2d); -Ensaio de Resistência à Flexão (2d); -Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d).

**10:30 95C+5FCC**  
| Descrição:  
(tolerância: 30min. Hora do ensaio: 11h06) -Ensaio de ultra-sons (2d); -Ensaio de Resistência à Flexão (2d); -Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d).

**11:50 90C+10WM**  
| Descrição: -1ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1620g C+180g WM)

**13:00 90C+10WM**  
| Descrição: - 2ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1620g C+180g WM)

**15:14 90C+10FCC**  
| Descrição: Desmoldagem da 1ªAmassadura

**16:00 85C+15WM**  
| Descrição: -2ªAmassadura de 4 doses (Receita:1530g C+270g WM)

**16:30 90C+10FCC**  
| Descrição: -Desmoldagem da 2ªAmassadura

**17:00 100C**  
| Descrição:  
-Ensaio de ultra-sons (7d); -Ensaio de Resistência à Flexão (7d); -Ensaio de Resistência à Compressão (7d); - Análise Microscópica (7d).

**17:05 85C+15WM**  
| Descrição: 1ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1530g C+270g WM)

**17:43 85C+15FCC**  
| Descrição:  
(tolerância: 2h) -Ensaio de ultra-sons (7d); -Ensaio de Resistência à Flexão (7d); -Ensaio de Resistência à Compressão (7d); - Análise Microscópica (7d).

**17:55 95C+5WM**  
| Descrição: - Desmoldagem da 1ªAmassadura

**19:10 95C+5WM**  
| Descrição: -Desmoldagem da 2ªAmassadura

#### Qui 28 de Abr de 2011

**09:30 90C+10FCC**  
| Descrição:  
(tolerância: 30min. hora do ensaio: 15h14) -Ensaio de ultra-sons (2d); -Ensaio de Resistência à Flexão (2d); -Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d).

**11:30 90C+10WM**  
| Descrição: (Hora do ensaio: 11h50) Desmoldagem 1ªAmassadura

**12:00 90C+10WM**  
| Descrição: (Hora do ensaio: 13h10) Desmoldagem da 2ªAmassadura

**12:30 95C+5WM**  
| Descrição:  
(tolerância: 30min. hora do ensaio: 17h55) -Ensaio de ultra-sons (2d); -Ensaio de Resistência à Flexão (2d); -Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d).

**14:00 80C+20WM**  
| Descrição: Hora do ensaio: 10h40 1ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1440g C+360g WM)

**15:00 80C+20WM**  
| Descrição: Hora: 11h45 2ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1440g C+360g WM)

**16:00 85C+15WM**  
| Descrição: (Hora do ensaio: 17h05) Desmoldar 1ªAmassadura

**16:30 85C+15WM**

Descrição: (Hora do ensaio: 18h10) Desmoldagem da 2ªAmassadura

**17:00 80C+5FCC+15WM**

Descrição: Hora do ensaio: 17h35 1ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1440g C+90g FCC+ 270g WM)

**18:00 80C+5FCC+15WM**

Descrição: Hora: 19h30 2ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1440g C+90g FCC+ 270g WM)

**Sex 29 de Abr de 2011**

**11:30 90C+10WM**

Descrição:  
(tolerância: 30min. Hora do ensaio: 11h50) - Ensaio de Ultra-sons (2d); - Ensaio de Resistência à Flexão (2d); - Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d)

**13:30 80C+20WM**

Descrição: Hora. 10h40 Desmoldagem 1ªAmassadura

**14:00 80C+20WM**

Descrição: Hora: 11h45 Desmoldagem 2ªAmassadura

**14:30 85C+15WM**

Descrição:  
(tolerância: 30min. Hora do ensaio: 17h05) - Ensaio de Ultra-sons (2d); - Ensaio de Resistência à Flexão (2d); - Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d).

**17:00 80C+5FCC+15WM**

Descrição: Hora do ensaio: 17h35 Desmoldagem 1ªAmassadura

**18:00 80C+5FCC+15WM**

Descrição: Hora do ensaio: 19h30 Desmoldagem 2ªAmassadura

**Sáb 30 de Abr de 2011**

**14:00 80C+20WM**

Descrição:  
(hora do ensaio: 10h40. tolerância:30min) - Ensaio de Ultra-sons (2d); - Ensaio de Resistência à Flexão (2d); - Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d)

**17:00 80C+5FCC+15WM**

Descrição:  
(hora do ensaio: 17h35. tolerância: 30min) - Ensaio de Ultra-sons (2d); - Ensaio de Resistência à Flexão (2d); - Ensaio de Resistência à Compressão (2d); - Análise Microscópica (2d)

**Seg 2 de Mai de 2011**

**08:40 80C+10FCC+10WM**

Descrição: 1ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1440g C+ 180g FCC+ 180g WM)

**09:55 80C+10FCC+10WM**

Descrição: 2ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1440g C+ 180g FCC+ 180g WM)

**10:00 100C(+SP)**

Descrição:  
(tolerância: 2h. Hora do ensaio: 08h50) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**12:15 80C+15FCC+5WM**

Descrição: 1ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1440g C+ 270g FCC+ 90g WM)

**13:00 95C+5FCC**

Descrição:  
(tolerância: 2h. Hora do ensaio: 11h06) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**14:15 80C+15FCC+5WM**

Descrição: 2ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1440g C+ 270g FCC+ 90g WM)

**Ter 3 de Mai de 2011**

**08:30 80C+10FCC+10WM**

Descrição: (Hora do ensaio: 9h55) Desmoldagem 2ªAmassadura

**08:40 80C+10FCC+10WM**

Descrição: (Hora do ensaio: 8h40) Desmoldagem 1ªAmassadura

**09:00 90C+10FCC**

Descrição:  
(tolerância: 2h. hora do ensaio: 15h14) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**10:00 75C+5FCC+20WM**

Descrição: -1ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1350g C+90g FCC + 360g WM)

**11:00 75C+5FCC+20WM**

Descrição: -2ªAmassadura de 4 doses (Receita: 1350g C+90g FCC + 360g WM)

**12:00 80C+15FCC+5WM**

Descrição: (Hora do ensaio: 12h15) Desmoldagem 1ª Amassadura

**12:30 80C+15FCC+5WM**

Descrição: (Hora do ensaio: 14h15) Desmoldagem da 2ª Amassadura

**13:00 75C+10FCC+15WM**

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1350g C+180g FCC + 270g WM)

**14:00 75C+10FCC+15WM**

Descrição: -2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1350g C+180g FCC + 270g WM)

**15:00 95C+5WM**

Descrição:  
(tolerância: 2h, hora do ensaio: 17h55) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**Qua 4 de Mai de 2011**

**08:00 80C+10FCC+10WM**

Descrição:  
(Hora do ensaio: 8h40. Tolerância: 30min.) Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**10:00 75C+5FCC+20WM**

Descrição: Desmoldagem 1ª Amassadura

**10:30 75C+5FCC+20WM**

Descrição: Desmoldagem 2ª Amassadura

**11:00 80C+15FCC+5WM**

Descrição:  
(Hora do ensaio: 12h15. Tolerância: 30min.) Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**12:00 75C+15FCC+10WM**

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1350g C+270g FCC+ 180g WM)

**13:00 75C+15FCC+10WM**

Descrição: -2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1350g C+270g FCC+ 180g WM)

**14:00 75C+10FCC+15WM**

Descrição: Desmoldagem 1ª Amassadura

**14:30 75C+10FCC+15WM**

Descrição: Desmoldagem 2ª Amassadura

**15:00 70C+5FCC+25WM**

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1200g C+90g FCC+ 450g WM)

**16:00 70C+5FCC+25WM**

Descrição: -2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1200g C+90g FCC+ 450g WM)

**17:00 90C+10WM**

Descrição:  
(tolerância: 2h, Hora do ensaio: 11h50) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**19:00 85C+15WM**

Descrição:  
(tolerância: 2h, Hora do ensaio: 17h05) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**Qui 5 de Mai de 2011**

**09:30 75C+5FCC+20WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**11:30 75C+15FCC+10WM**

Descrição: Desmoldagem da 1ª Amassadura

**12:00 75C+15FCC+10WM**

Descrição: Desmoldagem da 2ª Amassadura

**12:30 75C+10FCC+15WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**14:00 70C+10FCC+20WM**

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1260g C+180g FCC+ 360g WM)

**15:00 70C+10FCC+20WM**

Descrição: -2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1260g C+180g FCC+ 360g WM)

**16:00 70C+5FCC+25WM**

Descrição: -Desmoldagem da 1ª Amassadura

**16:30 70C+5FCC+25WM**

Descrição: -Desmoldagem da 2ª Amassadura

**17:00 70C+15FCC+15WM**

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1260g C+ 270g FCC+270g WM)

**18:00 70C+15FCC+15WM**

Descrição: -2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1260g C+ 270g FCC+270g WM)

**19:00 80C+20WM**

Descrição:

(hora do ensaio: 10h40. tolerância: 2h) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**20:30 80C+5FCC+15WM**

Descrição:

(hora do ensaio: 17h35. tolerância: 2h) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**Sex 6 de Mai de 2011**

**11:30 75C+15FCC+10WM**

Descrição:

Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**13:00 70C+10FCC+20WM**

Descrição: Desmoldagem da 1ª Amassadura

**13:30 70C+10FCC+20WM**

Descrição: Desmoldagem da 2ª Amassadura

**14:00 70C+5FCC+25WM**

Descrição:

Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**16:00 75C+25WM**

Descrição: -1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1350g C+450g WM)

**17:00 75C+25WM**

Descrição: 2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1350g C+450g WM)

**18:00 70C+15FCC+15WM**

Descrição: Desmoldagem da 1ª Amassadura

**18:30 70C+15FCC+15WM**

Descrição: Desmoldagem da 2ª Amassadura

**19:00 70C+30WM**

Descrição: 1ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1260g C+540g WM)

**20:00 70C+30WM**

Descrição: 2ª Amassadura de 4 doses (Receita: 1260g C+540g WM)

**21:30 90C+10WM (R1)**

Descrição: Repetição da 1ª amassadura de 4 doses

**Sáb 7 de Mai de 2011**

**00:00 75C+10FCC+15WM (R1)**

Descrição: - Repetição da 1ª Amassadura de 4 Doses

**14:00 70C+10FCC+20WM**

Descrição:

Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**16:00 75C+25WM**

Descrição: Desmoldagem 1ª Amassadura

**16:30 75C+25WM**

Descrição: Desmoldagem 2ª Amassadura

**17:00 70C+15FCC+15WM**

Descrição:

Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**19:00 70C+30WM**

Descrição: Desmoldagem 1ª Amassadura

**19:30 70C+30WM**

Descrição: Desmoldagem 2ª Amassadura

**23:00 90C+10WM(R1)**

Descrição: - Desmoldagem da 1ª Amassadura de 4 doses

**Dom 8 de Mai de 2011**

**00:30 75C+10FCC+15WM**

Descrição: - Desmoldagem da 1ª Amassadura de 4 Doses

**16:00 75C+25WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**19:00 70C+30WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Flexão (2d); Ensaio de Resistência à Compressão (2d); Análise Microscópica (2d).

**23:00 90C+10WM(R1)**

Descrição: - Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência Mecânica (2d); Análise microscópica (2d).

**Seg 9 de Mai de 2011**

**00:30 75C+10FCC+15WM(R1)**

Descrição: Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à Compressão(2d); Análise Microscópica (2d)

**08:00 80C+10FCC+10WM**

Descrição:  
(Hora do ensaio: 8h40. Tolerância: 2h) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**11:00 80C+15FCC+5WM**

Descrição:  
(Hora do ensaio: 12h15. Tolerância: 2h) Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**Ter 10 de Mai de 2011**

**10:00 75C+5FCC+20WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**13:00 75C+10FCC+15WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**Qua 11 de Mai de 2011**

**12:00 75C+15FCC+10WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**15:00 70C+5FCC+25WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**Qui 12 de Mai de 2011**

**14:00 70C+10FCC+20WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**17:00 70C+15FCC+15WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**Sex 13 de Mai de 2011**

**16:00 75C+25WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**19:00 70C+30WM**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão (7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica (7d).

**23:00 90C+10WM(R1)**

Descrição: Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão(7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica(7d).

**Sáb 14 de Mai de 2011**

**00:30 75C+10FCC+15WM(R1)**

Descrição: Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à Flexão(7d); Ensaio de Resistência à Compressão (7d); Análise Microscópica(7d).

**Seg 16 de Mai de 2011**

**11:00 90C+10FCC**

Descrição: - Consistência Normal - Tempo de presa

**12:00 95C+5WM**

Descrição: - Consistência Normal - Tempo de presa

**Ter 17 de Mai de 2011**

**11:00 90C+10WM**

Descrição: - Consistência Normal - Tempo de presa

**12:00 85C+15WM**

Descrição: - Consistência Normal - Tempo de presa

**Qua 18 de Mai de 2011**

**11:15 100C**

Descrição: Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**11:20 100C**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**13:20 100C**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**15:30 100C**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**15:30 100C(+SP)**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**17:43 85C+15FCC**

Descrição:  
(tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d)

**19:35 85C+15FCC**

Descrição: Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**19:40 85C+15FCC**

Descrição:  
(tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**Qui 19 de Mai de 2011**

**08:00 95C+5FCC**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**10:00 90C+10FCC**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**11:00 80C+20WM**

Descrição: - Consistência Normal - Tempo de presa

**12:30 95C+5WM**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**13:00 85C+15FCC**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**Sex 20 de Mai de 2011**

**08:00 80C+20WM**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**08:00 85C+15WM**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**09:00 75C+25WM**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**11:00 70C+30WM**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**12:30 90C+10WM**

Descrição: - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**Seg 23 de Mai de 2011**

**07:30 100C(+SP)**

**Descrição:**  
(tolerância: 2h. Hora do ensaio: 08h50) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**09:30 100C(+SP)**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**09:35 100C(+SP)**

**Descrição:**  
(tolerância: 2h. Hora do ensaio: 09h52) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Ensaio de Ultra-sons (28d-B);

**11:30 95C+5FCC**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 11h06) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d)

**13:30 95C+5FCC**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**13:35 95C+5FCC**

**Descrição:**  
(tolerância: 2h. Hora do ensaio: 12h00) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**Ter 24 de Mai de 2011**

**09:00 90C+10FCC**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 15h14) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**11:00 90C+10FCC**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**11:05 90C+10FCC**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 16h30) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Ensaio de Ultra-sons (28d-B);

**13:00 95C+5WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 17h55) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**15:00 95C+5WM**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**15:05 95C+5WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 19h10) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**Qua 25 de Mai de 2011**

**11:00 90C+10WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 11h50) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**13:00 90C+10WM**

**Descrição:** Retirar provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**13:05 90C+10WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 2h. Hora do ensaio: 13h10) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**15:00 85C+15WM**

**Descrição:** Retirar provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**15:05 85C+15WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 17h05) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**17:00 85C+15WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 18h10) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Ensaio de Ultra-sons (28d-B);

**Qui 26 de Mai de 2011**

**13:00 80C+20WM**

**Descrição:**  
(hora do ensaio: 10h40, tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**15:00 80C+20WM**

**Descrição:** Retirar provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**15:05 80C+20WM**

**Descrição:**  
(hora do ensaio: 11h45, tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**17:05 80C+5FCC+15WM**

**Descrição:**  
(hora do ensaio: 17h35, tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**19:00 80C+5FCC+15WM**

**Descrição:**  
(hora do ensaio: 19h30, tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**21:00 80C+5FCC+15WM**

**Descrição:** Retirar provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**Sex 27 de Mai de 2011**

**08:00 80C+5FCC+15WM**

**Descrição:** - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**13:00 80C+10FCC+10WM**

**Descrição:** - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**14:00 80C+15FCC+5WM**

**Descrição:** - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**Sáb 28 de Mai de 2011**

**08:00 75C+5FCC+20WM**

**Descrição:** - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**10:00 75C+10FCC+15WM**

**Descrição:** - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**13:00 75C+15FCC+10WM**

**Descrição:** - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**Dom 29 de Mai de 2011**

**10:30 70C+5FCC+25WM**

**Descrição:** - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**12:00 70C+10FCC+20WM**

**Descrição:** - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**15:00 70C+15FCC+15WM**

**Descrição:** - Determinação da pasta de consistência normal - Tempo de início e fim de presa

**Seg 30 de Mai de 2011**

**07:30 80C+10FCC+10WM**

**Descrição:**  
(Hora do ensaio: 8h40, Tolerância: 8h.) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**09:30 80C+10FCC+10WM**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**09:35 80C+10FCC+10WM**

**Descrição:**  
(Hora do ensaio: 9h55, Tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**11:30 80C+15FCC+5WM**

**Descrição:**  
(Hora do ensaio: 12h15, Tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**13:30 80C+15FCC+5WM**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**13:35 80C+15FCC+5WM**

**Descrição:**  
(Hora do ensaio: 14h15, Tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**Ter 31 de Mai de 2011**

**09:00 75C+5FCC+20WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**11:00 75C+5FCC+20WM**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**11:05 75C+5FCC+20WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**13:00 75C+10FCC+15WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**15:00 75C+10FCC+15WM**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**15:05 75C+10FCC+15WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**Qua 1 de Jun de 2011**

**11:17 100C**

**Descrição:** Ensaio de absorção de água por capilaridade: Colocar provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 no aquário.

**11:30 75C+15FCC+10WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**13:30 75C+15FCC+10WM**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**13:35 75C+15FCC+10WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**15:30 70C+5FCC+25WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**17:30 70C+5FCC+25WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**19:30 70C+5FCC+25WM**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**19:35 85C+15FCC**

**Descrição:** Ensaio de absorção de água por capilaridade: Colocar provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 no aquário.

**Qui 2 de Jun de 2011**

**13:00 70C+10FCC+20WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**15:00 70C+10FCC+20WM**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**15:05 70C+10FCC+20WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

**17:00 70C+15FCC+15WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

**19:00 70C+15FCC+15WM**

**Descrição:** Retirar os provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

**19:05 70C+15FCC+15WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

### Sex 3 de Jun de 2011

15:00 75C+25WM

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

17:00 75C+25WM

**Descrição:** Retirar provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

17:05 75C+25WM

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

19:00 70C+30WM

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

21:00 70C+30WM

**Descrição:** Retirar provetes 28d-cap1 e 28d-cap2 da câmara de cura e colocar na estufa a 40°.

21:05 70C+30WM

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (28d-B); Ensaio de Resistência à Flexão (28d-B); Ensaio de Resistência à Compressão (28d-B); Análise Microscópica (28d-B).

23:00 90C+10WM

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

### Sáb 4 de Jun de 2011

00:00 75C+10FCC+15WM(R1)

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (28d); Ensaio de Resistência à Flexão (28d); Ensaio de Resistência à Compressão (28d); Análise Microscópica (28d).

### Seg 6 de Jun de 2011

07:00 100C(V2)

**Descrição:** - Repetição da 2ª Amassadura de 4 doses

07:30 100C(V2)

**Descrição:** - Repetição da 1ª Amassadura de 4 doses

09:00 100C(+SP)

**Descrição:** Ensaio de absorção de água por capilaridade.

09:30 100C(CEN) (V2)

**Descrição:** - Repetição da 1ª Amassadura de 4 Dose

10:30 100C(CEN) (V2)

**Descrição:** - Repetição da 2ª Amassadura de 4 doses

12:00 95C+5FCC

**Descrição:** Ensaio de absorção de água por capilaridade

13:00 85C+15FCC (V2)

**Descrição:** - Repetição da 1ª Amassadura de 4 doses

14:30 85C+15FCC(V2)

**Descrição:** - Repetição da 2ª Amassadura de 4 doses

### Ter 7 de Jun de 2011

11:00 90C+10FCC

**Descrição:** Ensaio de absorção de água por capilaridade

11:30 100C(CEN) (R2)

**Descrição:** Desmoldagem da 1ª Amassadura de 4 doses Desmoldagem da 2ª Amassadura de 4 doses

14:00 95C+5WM

**Descrição:** Ensaio de absorção de água por capilaridade

14:30 100C(V2)

**Descrição:** Desmoldagem da 1ª Amassadura de 4 doses; Desmoldagem da 2ª Amassadura de 4 doses

16:00 85C+15FCC(V2)

**Descrição:** Desmoldagem da 1ª Amassadura de 4 doses; Desmoldagem da 2ª Amassadura de 4 doses

**Qua 8 de Jun de 2011**

**08:00 100C(CEN) (V2)**

Descrição: Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à compressão (2d); Análise microscópica(2d)

**10:00 100C(V2)**

Descrição: Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à compressão (2d); Análise microscópica(2d)

**13:00 90C+10WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade

**16:00 85C+15WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade

**17:30 85C+15FCC(V2)**

Descrição: Ensaio de Ultra-sons (2d); Ensaio de Resistência à compressão (2d); Análise microscópica(2d)

**Qui 9 de Jun de 2011**

**15:00 80C+20WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade

**18:00 85C+5FCC+15WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade

**Seg 13 de Jun de 2011**

**08:00 100C(CEN) (V2)**

Descrição: Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à compressão (7d); Análise microscópica(7d)

**09:00 80C+10FCC+10WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade

**10:00 100C(V2)**

Descrição: Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à compressão (7d); Análise microscópica(7d)

**12:00 80C+15FCC+5WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade

**16:30 85C+15FCC (V2)**

Descrição: Ensaio de Ultra-sons (7d); Ensaio de Resistência à compressão (7d); Análise microscópica(7d)

**Ter 14 de Jun de 2011**

**11:00 75C+5FCC+20WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade

**14:00 75C+10FCC+15WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

**Qua 15 de Jun de 2011**

**12:25 75C+15FCC+10WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade

**12:30 100C**

Descrição:  
Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**16:00 70C+5FCC+25WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

**18:30 85C+15FCC**

Descrição:  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 19h35) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Qui 16 de Jun de 2011**

**15:00 70C+10FCC+20WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

**18:00 70C+15FCC+15WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

**Sex 17 de Jun de 2011**

**17:00 75C+25WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

**20:00 70C+30WM**

Descrição: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

**Seg 20 de Jun de 2011**

**09:00 100C(+SP)**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 09h52) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**12:00 95C+5FCC**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 12h00) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Ter 21 de Jun de 2011**

**11:00 90C+10FCC**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 16h30) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**14:00 95C+5WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 19h10) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Qua 22 de Jun de 2011**

**13:00 90C+10WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 13h10) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**16:00 85C+15WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 18h10) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Qui 23 de Jun de 2011**

**15:00 80C+20WM**

**Descrição:**  
(hora do ensaio: 11h45. tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**18:00 85C+5FCC+15WM**

**Descrição:**  
(hora do ensaio: 19h30. tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Seg 27 de Jun de 2011**

**09:00 80C+10FCC+10WM**

**Descrição:**  
(Hora do ensaio: 9h55. Tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**12:00 80C+15FCC+5WM**

**Descrição:**  
(Hora do ensaio: 14h15. Tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Ter 28 de Jun de 2011**

**11:00 75C+5FCC+20WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**14:00 75C+10FCC+15WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Qua 29 de Jun de 2011**

**13:00 75C+15FCC+10WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**16:00 70C+5FCC+25WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Qui 30 de Jun de 2011**

**15:00 70C+10FCC+20WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**18:00 70C+15FCC+15WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Sex 1 de Jul de 2011**

**17:00 75C+25WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**20:00 70C+30WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à Flexão (56d); Ensaio de Resistência à Compressão (56d); Análise Microscópica (56d).

**Seg 4 de Jul de 2011**

**08:00 100C(CEN) (V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (28d; 28d-B); Ensaio de Resistência à compressão (28d; 28d-B); Análise microscópica(28d; 28d-B)

**10:00 100C(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (28d; 28d-B); Ensaio de Resistência à compressão (28d; 28d-B); Análise microscópica(28d; 28d-B)

**17:00 85C+15FCC(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (28d; 28d-B); Ensaio de Resistência à compressão (28d; 28d-B); Análise microscópica(28d; 28d-B)

**Seg 18 de Jul de 2011**

**08:00 100C(CEN) (V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (42d); Ensaio de Resistência à compressão (42d); Análise microscópica(42d)

**10:00 100C(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (42d); Ensaio de Resistência à compressão (42d); Análise microscópica(42d)

**17:00 85C+15FCC(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (42d); Ensaio de Resistência à compressão (42d); Análise microscópica(42d)

**Ter 19 de Jul de 2011**

**09:00 95C+5FCC(V2)**

**Descrição:** 1ª Amassadura de 4 doses 2ª Amassadura de 4 doses

**11:17 100C**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**18:30 85C+15FCC**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 19h35) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**Qua 20 de Jul de 2011**

**08:00 95C+5FCC(V2)**

**Descrição:** Desmoldagem da 1ª e 2ª Amassadura

**Qui 21 de Jul de 2011**

**08:30 95C+5FCC(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons; Resistência mecânica (2d); Análise microscópica (2d);

**Dom 24 de Jul de 2011**

**09:00 100C(+SP)**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 09h52) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**12:00 95C+5FCC**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 12h00) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**Seg 25 de Jul de 2011**

**11:00 90C+10FCC**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 16h30) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**14:00 95C+5WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. hora do ensaio: 19h10) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**Ter 26 de Jul de 2011**

**08:30 95C+5FCC(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons(7d); Resistência mecânica (7d); Análise microscópica (7d);

**13:00 90C+10WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 13h10) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**16:00 85C+15WM**

**Descrição:**  
(tolerância: 8h. Hora do ensaio: 18h10) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**Qua 27 de Jul de 2011**

**15:00 80C+20WM**

**Descrição:**  
(hora do ensaio: 11h45. tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**18:00 85C+5FCC+15WM**

**Descrição:**  
(hora do ensaio: 19h30. tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**Dom 31 de Jul de 2011**

**09:00 80C+10FCC+10WM**

**Descrição:**  
(Hora do ensaio: 9h55. Tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**12:00 80C+15FCC+5WM**

**Descrição:**  
(Hora do ensaio: 14h15. Tolerância: 8h) Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**Seg 1 de Ago de 2011**

**08:00 100C(CEN) (V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à compressão (56d); Análise microscópica(56d)

**09:30 100C(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à compressão (56d); Análise microscópica(56d)

**11:00 75C+5FCC+20WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**14:00 75C+10FCC+15WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**17:00 85C+15FCC(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (56d); Ensaio de Resistência à compressão (56d); Análise microscópica(56d)

**Ter 2 de Ago de 2011**

**13:00 75C+15FCC+10WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**16:00 70C+5FCC+25WM**

**Descrição:**  
Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**Qua 3 de Ago de 2011**

**15:00 70C+10FCC+20WM**

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**18:00 70C+15FCC+15WM**

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**Qui 4 de Ago de 2011**

**17:00 75C+25WM**

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**20:00 70C+30WM**

**Descrição:**

Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à Flexão (90d); Ensaio de Resistência à Compressão (90d); Análise Microscópica (90d).

**Ter 16 de Ago de 2011**

**09:00 95C+5FCC(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons(28d, 28d-B); Resistência mecânica (28d, 28d-B); Análise microscópica (28d; 28d-B);

**Dom 4 de Set de 2011**

**09:00 100C(CEN) (V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à compressão (90d); Análise microscópica(90d)

**10:30 100C(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à compressão (90d); Análise microscópica(90d)

**12:00 85C+15FCC(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons (90d); Ensaio de Resistência à compressão (90d); Análise microscópica(90d)

**Dom 11 de Set de 2011**

**95C+5FCC(V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons(56d); Resistência mecânica (56d); Análise microscópica (56d);

**Sáb 15 de Out de 2011**

**09:00 95C+5FCC (V2)**

**Descrição:** Ensaio de Ultra-sons(90d); Resistência mecânica (90d); Análise microscópica (90d);



## **ANEXO B – FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS**

B.1 – CIMENTO PORTLAND (CEM I 42,5R);

B.2 – ENSAIOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS LASER;

B.3 – AGREGADOS;

B.4 – SUPERPLASTIFICANTE.



## B.1 – CIMENTO PORTLAND (CEM I 42,5R)



FICHA TÉCNICA

### Cimento Portland CEM I 42,5R



NP EN 197-1 0856

#### ▶ Constituintes

Clinker  $\geq 95\%$   
Constituintes adicionais minoritários  $\leq 5\%$   
Sulfato de cálcio regulador de presa



#### ▶ Características

##### ▶ Químicas

Perda ao fogo (P.F.)  $\leq 5,0\%$   
Resíduo insolúvel (R.I.)  $\leq 5,0\%$   
Sulfatos ( $SO_3$ )  $\leq 4,0\%$   
Cloretos (Cl)  $\leq 0,10\%$

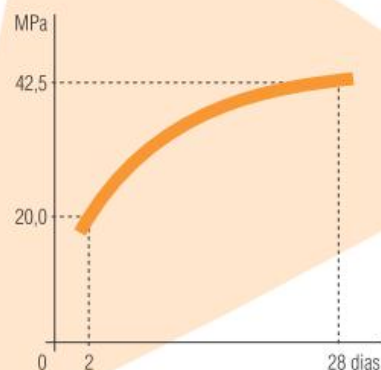
##### ▶ Físicas

Início de presa (min)  $\geq 60$   
Expansibilidade (mm)  $\leq 10$

##### ▶ Mecânicas

Resistência à compressão  
Valores mínimos  
2 dias: 20,0 MPa  
28 dias: 42,5 MPa

Resistência mecânica à compressão  
Curva de crescimento mínimo



#### ▶ Propriedades especiais do betão fabricado com este cimento

- ▶ Desenvolvimento rápido das resistências mecânicas
- ▶ Elevadas resistências a todas as idades
- ▶ Particularmente adequado para Classes de Exposição XC

Cimento Portland  
CEM I 42,5R



## ▶ Utilizações recomendadas

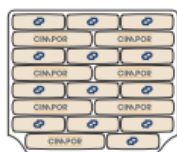
- ▶ **Betão armado**  
Indicado indistintamente para todas as classes de resistência com especial vantagem nas de C30/37 a C45/55  
Com desempenho mecânico elevado a 28 dias
- ▶ **Pré-fabricação**  
Elementos estruturais em betão armado e pré-esforçado
- ▶ **Pavimentos rodoviários**  
Camadas de desgaste para pavimentos fortemente solicitados
- ▶ **Caldas de injeção de uso generalizado**

## ▶ Acondicionamento



**Palete**

49 Sacos de 35 kg - 1715 kg



**Pacotão**

55 Sacos de 35kg - 1925 kg

Camião de 25 toneladas com meios de descarga próprios devidamente selado



**Granel**  
25 toneladas

## ▶ Precauções na aplicação

- ▶ Evitar tempos de transporte elevados no caso de betão pronto
- ▶ Respeitar as dosagens de cimento mínimas e as relações água/cimento máximas normativas
- ▶ Assegurar uma cura e protecção adequadas de acordo com as disposições normativas
- ▶ Betonagem em tempo quente e seco

## ▶ Contra-indicações

- ▶ Contacto com ambientes agressivos (águas e solos)
- ▶ Betonagem em grandes massas
- ▶ Argamassas de uso geral

## ▶ Ambiente e Segurança

- ▶ Usar vestuário de protecção, luvas e equipamento protector para a vista/face adequados
- ▶ Quando ensacado contém redutor de crómio (VI) cujo período de eficácia é de dois meses após a data de ensacagem
- ▶ Para mais informações, consulte a Ficha de Dados de Segurança



### ÁREA COMERCIAL

Av. Severiano Falcão, 8 - Edifício CIMPOR - 2689-524 PRIOR VELHO  
Tel.: 21 940 86 43 - Fax: 21 940 87 60

### ÁREA TÉCNICO-COMERCIAL

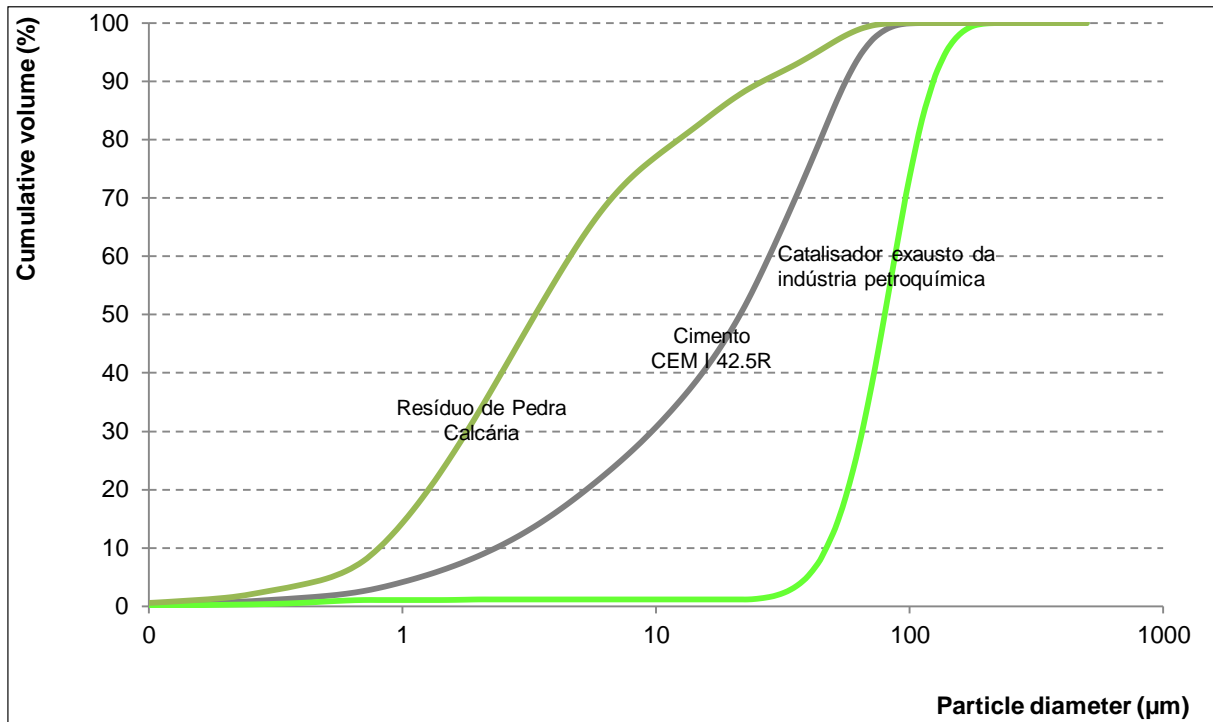
Av. Severiano Falcão, 8 - Edifício CIMPOR - 2689-524 PRIOR VELHO  
Tel.: 21 940 86 43 - Fax: 21 940 87 54

### ENCOMENDAS, CONTROLO DE VENDAS E CRÉDITO

S. Pedro Filis - Maia - Apartado 1023 - 4449-909 ERMESINDE  
Tel.: 22 968 80 00 - Fax: 22 967 18 38

www.cimpor-portugal.pt  
Dcomercial@cimpor.com

## B.2 – ENSAIOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS LASER;



A representação gráfica é referente à análise granulométrica, realizada por difração de laser, efectuada sobre os ligantes – cimento CEM I 42,5R, catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural calcária – utilizados neste ensaio.

O gráfico representa o diâmetro das partículas de ligante ( $\mu\text{m}$ ) em função do volume acumulado (%). Observa-se que, de entre os materiais, é o resíduo de pedra calcária que apresenta diâmetro de partículas inferiores, podendo compreender-se, assim, o efeito de *filler*, apresentado por este.

## B.3 – AGREGADOS



# Société Nouvelle du Littoral

Siège Social & Usine : Z.A. – BP 9 – 11370 LEUCATE (France)

Tél. : 33 (0) 4 68 40 14 05 – Fax : 33 (0) 4 68 40 92 72

Internet : [www.s-n-l.fr](http://www.s-n-l.fr) - e.mail : [contact@s-n-l.fr](mailto:contact@s-n-l.fr) • [s.n.l@wanadoo.fr](mailto:s.n.l@wanadoo.fr)

SABLE NORMALISE CEN  
CERTIFIE CONFORME –  
EN 196.1 par l'AFNOR et conforme ISO 679

## CEN STANDARD SAND

CERTIFIED IN ACCORDANCE WITH EN 196-1  
CONFORMING TO ISO 679

Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des Matériaux  
de la Ville de Paris (L.E.M.V.P.)  
4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy  
75014 PARIS

**Methods of cement testing**  
Sand for strength measurements

### 1- CHARACTERISTICS :

CEN Standard sand (ISO standard sand) is a natural sand, which is siliceous particularly its finest fractions. It is clean, the particles are generally isometric and rounded in shape. It is dried, screened and prepared in a modern workshop which offers every guarantee in terms of quality and consistency.

The sand is packaged in polyethylene bags each containing  $1\,350 \pm 5$  g.

Deliveries are made in boxes of 16 bags weighing 21.6 kg and in pallets of 2 to 54 boxes, suitably protected by a polyethylene cover (land transport) or reinforced boxes (shipping).

### 2- CONTROLS

The grading, measured by sieving, complies with the requirements of EN 196-1 (§5) and of ISO 679: 2009 (§5).

Square mesh Size (mm)	Cumulative (%) retained
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

This analysis is complemented by bag mass controls, water content controls and strength controls, in accordance with EN 196-1 (§11) and ISO 679: 2009 (§11).

### 3- CONFORMITY

CEN standard conformity is carried out by L.E.M.V.P. (Material Test Laboratory), 4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy - 75014 PARIS

Production has been certified by AFNOR (Association Française de Normalisation), 11 Rue Francis de Pressensé – 93571 La Plaine Saint Denis Cédex.

MAJ : 1 - 05/11



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CIMENTS



## INFORMAÇÃO TÉCNICA

DATA SHEET / NOTICE TECHNIQUE

**PRODUTO:** AREIA  
**REF<sup>a</sup> .:** SM60/30

**NATUREZA / NATURE** Areia / Sand / Quartz

**VALORES TIPO / TYPICAL VALUES / VALEURS TYPE**  
**Matéria Prima / Raw Material / Matière Première**

**CARACTERISTICAS QUÍMICAS / Chemical Specifications / Caractéristiques Chimiques \***

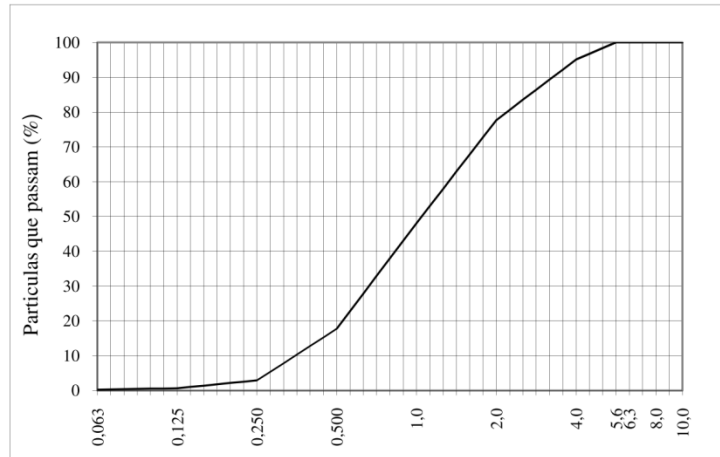
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
98.870%	0.630%	0.050%	0.009%	0.070%	0.210%	0.114%	0.035%	0.012%	0.001%

**CARACTERISTICAS FISICAS / Physical Specifications / Caractéristiques Physiques \***

<b>HUMIDADE (Moisture / Humidité)</b>	0,00%	<b>DIN 53198</b>
<b>BRANCURA (Brightness / Blancheur)</b>	83,55	<b>L*</b>
<b>DENSIDADE APARENTE (Non Compacted Bulk Density / D.A. Non Tassée)</b>	1,58g/ml	<b>EN 12902</b>
<b>DUREZA MOHS (Mohs Hardness / Dureté Mohs)</b>	7	
<b>INDICE de REFRAÇÃO (Refractive index / Indice de Réfraction)</b>	1,55	
<b>PESO ESPECIFICO (Specific Gravity / Poids Spécifique)</b>	2,62mg/m <sup>3</sup>	<b>NP EN 1097-6</b>
<b>Ph</b>	7	<b>ISO 787/9</b>
<b>CORTE SUPERIOR (Top Cut / Coupure)</b>	500µm	<b>NP EN 933-1</b>

**ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (Particle size distribution)\***

PENEIROS	RETIDO	ACUMULADO	PASSA
mm	%	%	%
10	0,0	0	100
8,0	0,0	0	100
6,3	0,0	0	100
5,6	0,0	0	100
4,0	4,9	5	95
2,0	17,4	22	78
1,0	29,6	52	48
0,5	30,4	82	18
0,25	14,8	97	3
0,125	2,2	99	1
0,063	0,4	100	0
<0,063	0,2	100	



**PENEIROS DE CONTROLO DIN ISO 3310-1**

**A elaboração deste produto baseia-se numa matéria prima natural, pelo que nos reservamos o direito de alteração dos valores apresentados.**

As this product is based on naturally occurring raw materials we reserve the right to change this should it become necessary.

Ce produit étant élaboré à partir d'une matière première naturelle, nous nous réservons le droit de modifier les valeurs données.

\* **VALORES INDICATIVOS (Indicatif values / Valeurs indicatives)**

## INFORMAÇÃO TÉCNICA

DATA SHEET / NOTICE TECHNIQUE

PRODUTO: AREIA

REF<sup>a</sup>: AS 30/40

NATUREZA / NATURE **Areia Cristalina / Sand / Quartz**

VALORES TIPO / TYPICAL VALUES / VALEURS TYPE

**Matéria Prima / Raw Material / Matière Première**

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS / Chemical Specifications / Caractéristiques Chimiques \*

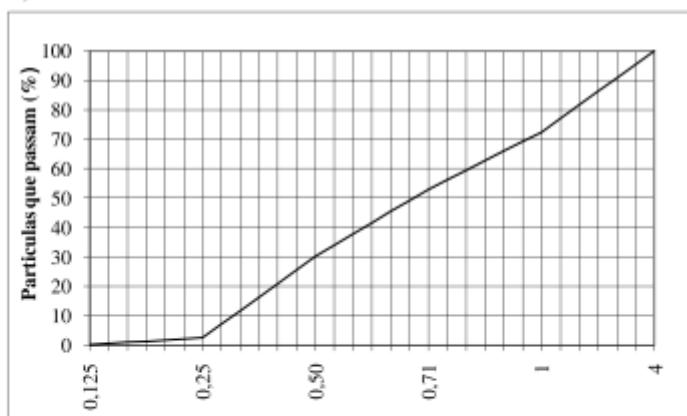
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
98,39%	1,130%	0,041%	0,016%	0,070%	0,270%	0,244%	0,020%	0,012%	0,001%

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS / Physical Specifications / Caractéristiques Physiques \*

HUMIDADE (Moisture / Humidité)	0% máx	DIN 53198
BRANCURA (Brightness / Blancheur)	77,24	L*
DENSIDADE APARENTE (Non Compacted Bulk Density / D.A. Non Tassée)	1,58g/cm <sup>3</sup>	ISO 903
DUREZA MOHS (Mohs Hardness / Dureté Mohs)	7	
ÍNDICE de REFRAÇÃO (Refractive index / Indice de Réfraction)	1,55	
PESO ESPECÍFICO (Specific Gravity / Poids Spécifique)	2,65g/cm <sup>3</sup>	DIN 53193
Ph	7	ISO 787/9
CORTE SUPERIOR (Top Cut / Coupure)	1,4mm	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (Particle size distribution)\*

PENEIROS mm	RETIDO %	ACUMULADO %	PASSA %
4	0,00	0,00	100,00
1	27,65	27,65	72,35
0,71	19,37	47,02	52,98
0,5	22,81	69,83	30,17
0,25	27,64	97,47	2,53
0,125	2,38	99,85	0,15
<0,125	0,15	100,00	



PENEIROS DE CONTROLO DIN ISO-3310

A elaboração deste produto baseia-se numa matéria prima natural, pelo que nos reservamos o direito de alteração dos valores apresentados.

As this product is based on naturally occurring raw materials we reserve the right to change this should it become necessary.

Ce produit étant élaboré à partir d'une matière première naturelle, nous nous réservons le droit de modifier les valeurs données.

\* VALORES INDICATIVOS (Indicatif values / Valeurs indicatives)

# INFORMAÇÃO TÉCNICA

DATA SHEET / NOTICE TECHNIQUE

**PRODUTO: AREIA**  
**REF<sup>a</sup>: S90/100**



1328 - CPD - 0033

**NATUREZA / NATURE**      **Areia Cristalina / Sand / Quartz**

**VALORES TIPO / TYPICAL VALUES / VALEURS TYPE**

**Matéria Prima / Raw Material / Matière Première**

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS / Chemical Specifications / Caractéristiques Chimiques \***

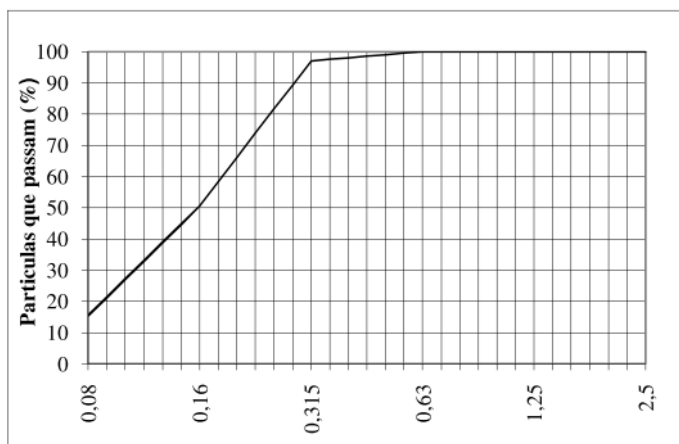
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
97,579%	1,230%	0,210%	0,020%	0,060%	0,220%	0,067%	0,580%	0,028%	0,005%

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS / Physical Specifications / Caractéristiques Physiques \***

<b>HUMIDADE</b> (Moisture / Humidité)	0,00%	<b>DIN 53198</b>
<b>DENSIDADE APARENTE</b> (Non Compacted Bulk Density / D.A. Non Tassée)	1,58g/ml	<b>EN 12902</b>
<b>DUREZA MOHS</b> (Mohs Hardness / Dureté Mohs)	7	
<b>ÍNDICE de REFRAÇÃO</b> (Refractive index / Indice de Réfraction)	1,55	
<b>PESO ESPECÍFICO</b> (Specific Gravity / Poids Spécifique)	2,67mg/m <sup>3</sup>	<b>NP EN 1097-6</b>
<b>Ph</b>	7	<b>ISO 787/9</b>
<b>AFA</b>	88	
<b>CORTE SUPERIOR</b> (Top Cut / Coupure)	1mm	

**ANÁLISE GRANULOMÉTRICA** (Particle size distribution)\*

PENEIROS mm	RETIDO %	ACUMULADO %	PASSA %
2,5	0,00	0,00	100,00
1,25	0,00	0,00	100,00
0,63	0,00	0,00	100,00
0,315	2,94	2,94	97,06
0,16	46,47	49,41	50,59
0,08	35,16	84,57	15,43
<0,08	15,43	100,00	



**PENEIROS DE CONTROLO DIN ISO-3310**

A elaboração deste produto baseia-se numa matéria prima natural, pelo que nos reservamos o direito de alteração dos valores apresentados.

As this product is based on naturally occurring raw materials we reserve the right to change this should it become necessary.

Ce produit étant élaboré à partir d'une matière première naturelle, nous nous réservons le droit de modifier les valeurs données.

\* **VALORES INDICATIVOS** (Indicatif values / Valeurs indicatives)

## B.4 – SUPERPLASTIFICANTE

**Ficha de Produto**  
Edição de Dezembro 2009  
Nº de identificação: 1.91 FC  
Versão nº 1  
SikaPlast® 898



# SikaPlast® 898

Powered by ViscoCrete®

## Superplastificante de elevado desempenho

Construction

### Descrição do produto

SikaPlast® 898 é um superplastificante para betão e argamassa que resulta dos últimos desenvolvimentos da tecnologia ViscoCrete®. Cumpre os requisitos da Norma NP EN 934-2: T 3.1/3.2, como superplastificante forte redutor de água para betão.

### Utilizações

SikaPlast® 898 permite obter uma muito forte plastificação e uma longa manutenção da consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.

SikaPlast® 898 permite a fabricação de:

- Betões plásticos e fluidos.
- Betões com diferentes razões A/C.
- Betão bombeado para longas distâncias.
- Betão com agregados britados.
- Prefabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ.

Nos betões fluidos, SikaPlast® 898 confere à composição uma boa robustez às variações da água e dos diferentes constituintes e assim melhora a estabilidade, limitando os riscos de segregação, comparando com os adjuvantes inicialmente desenvolvidos à base de policarboxilatos.

### Características / Vantagens

O SikaPlast® 898 é um superplastificante/forte redutor de água que confere ao betão as seguintes propriedades:

- Excelente trabalhabilidade conjugada com o elevado desempenho a nível do desenvolvimento das resistências.
- Alta redução de água, conforme a dosagem e a composição; daqui resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compacidade elevada e de permeabilidade muito baixa.
- Boas resistências iniciais e finais.
- Excelente performance quer usado sozinho como combinado com outros adjuvantes.
- Maior robustez contra variações nos agregados e/ou diferentes tipos de cimento.
- Bom aspecto da superfície na descofragem
- Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em prefabricação, com bom desenvolvimento de resistências.

SikaPlast® 898 é isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.

### Certificados / Boletins de ensaio

Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.

### Dados do produto

#### Aspecto / Cor

Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.

#### Fornecimento

200 litros; 1000 litros (1 m<sup>3</sup>); granel.



**Armazenagem e conservação** O produto deve estar armazenado nas embalagens de origem não encetadas e não deterioradas, ao abrigo da radiação do sol e da geada, a temperaturas entre +5 °C e +35 °C. Conserva-se 1 ano após a data de fabrico.

## Dados técnicos

**Base química** Combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa.

**Massa volúmica (23 ± 2 °C)** 1,07 ± 0,02 kg/dm<sup>3</sup>.

**pH (23 ± 2 °C)** 5,0 ± 1,0.

**Teor de sólidos** 32,0 ± 2 %.

**Teor em iões cloreto** < 0,1%.

## Informação sobre o sistema

### Pormenores de aplicação

**Consumo / Dosagem** Conforme o objectivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens:  
■ Dosagem corrente: 0,5% a 1,5% do peso do cimento.  
■ Dosagens especiais: 1,5% a 2,0% do peso do cimento.

**Mistura** Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de  $\frac{2}{3}$  da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energeticamente cerca de 1 minuto/m<sup>3</sup>; só então será adicionada mais alguma água até à consistência desejada. Este processo conduz ao aproveitamento máximo do adjuvante e permite controlar convenientemente a razão água/ligante. Se o processo não for viável, então adicionar o produto à água de amassadura previamente determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogénea. É importante garantir um tempo mínimo de 1,5 a 2 minutos de amassadura, para obter o efeito pleno do adjuvante. Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia). É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão. No caso de redosagem em obra, deve haver o cuidado de homogeneizar bem o adjuvante na massa do betão. Para isso, recomenda-se uma muito pequena adição de água no recipiente que contém o adjuvante, apenas para reduzir a sua viscosidade e facilitar a sua boa incorporação. O betão deve ser "puxado" acima e o adjuvante deve ser adicionado lentamente, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário, inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneização. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.

**Aplicação** SikaPlast® 898 permite o fabrico de betão de qualidade, conseqüentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação, a cura do betão e validada a sua aplicabilidade às condições locais.

**Compatibilidade** SikaPlast® 898 pode ser combinado com os seguintes produtos:  
■ Sika® FerroGard® 901.  
■ Sika® Pump.  
■ Sika® Rapid.  
■ Sikacrete®.  
Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.

**Limpeza de ferramentas** Com água.

**Importante** Recomenda-se a realização de ensaios prévios sempre para se verificar da adequabilidade do adjuvante ao fim a que se destina, para se encontrar a dosagem óptima do adjuvante e sempre que se altere algum componente na composição do betão.  
Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se.  
Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.

**Nota** Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Ensaio realizados noutras condições para determinação das mesmas características podem dar resultados diferentes devido a circunstâncias que estão fora do nosso controlo.

## Risco e segurança

**Medidas de segurança** Mercadoria não perigosa para transporte.  
Este produto não está classificado de acordo com a legislação da UE.  
Para mais informações consultar a Ficha de Dados de Segurança do produto e o respectivo rótulo.

*"O produto está seguro na C<sup>a</sup> Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nº CH00003018LI05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".*

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.



Sika Portugal, SA  
R. de Santarém, 113 Tel. +351 22 377 69 00  
4400-292 V. N. Gaia Fax +351 22 370 20 12  
Portugal www.sika.pt



## **ANEXO C – FICHAS DE REGISTO**

C.1 – ENSAIOS PRÉVIOS

C.2 – DADOS EXPERIMENTAIS REFERENTES A CADA MISTURA

C.3 – REPETIBILIDADE ENTRE AS DUAS AMASSADURAS CORRESPONDENTES A CADA MISTURA

C.4 – FICHA-SÍNTESE



## C.1 – ENSAIOS PRÉVIOS

### MISTURA 100 C

#### DIA 0 - Preparação da Argamassa

##### Composição:

CEM I 42,5 R - 1800 g

Água Destilada - 900 g

Areia: SM60/30 (1,6) - 382 g ; SM60/30 (1,0) - 709 g ; A30/40 (1,0) - 709 g ; A30/40 (0,5) - 1855 g ; A30/40 (0,16) - 1091 g ; S90/100 (0,08) - 655 g

**Dosagem:** 4 doses ( 1 Amassadura)

**Data:** 11 Abril, 11

**Hora ("tempo zero"):** 12H47

#### Mesa de Espalhamento

d1 (mm)	d2 (mm)	dm (mm)	10% dm	dm-d1	dm-d2
162,0	160,0	161,0	16,1	1,0	1,0

Obs.: Se  $10\% \text{ dm} > |\text{dm}-\text{d1}|$  e  $10\% \text{ dm} > |\text{dm}-\text{d2}|$  então  $\text{dm}=(\text{d1}+\text{d2})/2$ . Se não, repetir ensaio.

#### Massa Volúmica

**Peso do Recipiente (g):** 1127,9 g

**Peso do Recipiente+ Argamassa (g):** 2769,2 g

#### Teor de Ar contido na argamassa

% Teor de ar: 7,1%

### MISTURA 100 C

#### DIA 0 - Preparação da Argamassa

##### Composição:

CEM I 42,5 R - 450 g

Água Destilada - 225 g

Areia: SM60/30 (1,6) - 96 g ; SM60/30 (1,0) - 177 g ; A30/40 (1,0) - 177 g ; A30/40 (0,5) - 464 g ; A30/40 (0,16) - 273 g ; S90/100 (0,08) - 164 g

**Dosagem:** 1 dose

**Data:** 13 Abril, 11

**Hora ("tempo zero"):** 19H25

#### Mesa de Espalhamento

d1 (mm)	d2 (mm)	dm (mm)	10% dm	dm-d1	dm-d2
165,0	165,0	165,0	16,5	0,0	0,0

Obs.: Se  $10\% \text{ dm} > |\text{dm}-\text{d1}|$  e  $10\% \text{ dm} > |\text{dm}-\text{d2}|$  então  $\text{dm}=(\text{d1}+\text{d2})/2$ . Se não, repetir ensaio.

#### Massa Volúmica

**Peso do Recipiente (g):** 1031,3 g

**Peso do Recipiente+ Argamassa (g):** 2685,5 g

#### Teor de Ar contido na argamassa

% Teor de ar: N/A (Obs.: saída de água do aerómetro)

## MISTURA 100 C (CEN)

### DIA 0 - Preparação da Argamassa

#### Composição:

CEM I 42,5 R - 450 g

Água Destilada - 225 g

Areia Normalizada Comercial (CEN)- 1350 g

**Dosagem:** 1 dose

**Data:** 13 Abril, 11

**Hora ("tempo zero"):** 18H35

#### Mesa de Espalhamento

d1 (mm)	d2 (mm)	dm (mm)	10% dm	dm-d1	dm-d2
170,0	170,0	170,0	17,0	0,0	0,0

Obs.: Se  $10\% dm > |dm-d1|$  e  $10\% dm > |dm-d2|$  então  $dm = (d1+d2)/2$ . Se não, repetir ensaio.

#### Massa Volúmica

**Peso do Recipiente (g):** 1120,3 g

**Peso do Recipiente+ Argamassa (g):** 2782,3 g

#### Teor de Ar contido na argamassa

**% Teor de ar:** 6,2 (Obs.: saída de água do aerómetro)

Os dados experimentais apresentados, nas fichas acima, dizem respeito à fase de ensaios prévios na qual se averiguou, no estado fresco, a reprodutibilidade dos resultados aquando a preparação das argamassas: (i) na quantidade prevista na norma NP EN 196-1 [69] – 1 dose – e com o quádruplo da porção – 4 doses; (ii) com areias normalizadas comercial, 100C(CEN), e cuja separação granulométrica e mistura se efectuou no laboratório, 100C.

Os registos obtidos demonstram que, para dosagens diferentes, se obtêm, aproximadamente, os mesmos resultados. Por seu turno, a mistura produzida com areia normalizada comercial apresenta, embora não muito significativo, maior valor de espalhamento evidenciando que o agregado misturado em laboratório apresenta maior capacidade de absorção de água.

## C.2 – DADOS EXPERIMENTAIS REFERENTES A CADA MISTURA

Dada a extensão da dissertação apresenta-se, a título de exemplo, a ficha de dados referentes à mistura 100C, desenvolvida e utilizada durante o trabalho experimental.

### MISTURA 100 C

#### DIA 0 - Preparação da Argamassa

##### Composição:

CEM I 42,5 R - 1800g  
Água destilada - 900g  
Areia - 5400g

Dosagem: 4 doses

Data (1ª Amassadura): 6/6

Hora - "tempo zero"(1ª Amassadura): 11h45

Data (2ª Amassadura): 6/6

Hora - "tempo zero"(2ª Amassadura): 13h10

#### Mesa de Espalhamento

d1 (mm)	d2 (mm)	dm (mm)	10% dm	dm-d1	dm-d2
165,00	162,00	163,50	16,35	1,50	1,50

Obs.: Se  $10\% \text{ dm} > |\text{dm}-\text{d1}|$  e  $10\% \text{ dm} > |\text{dm}-\text{d2}|$  então  $\text{dm}=(\text{d1}+\text{d2})/2$ . Se não, repetir ensaio.

#### Massa Volúmica

Peso da Argamassa (g): 1641

#### Teor de Ar contido na argamassa

% Teor de ar: 6,1

Obs.:

#### DIA 1 - Desmoldagem dos Provetes

Data de Desmoldagem: 7/6

Hora de Desmoldagem (24h após "tempo zero"): 11h20; 12h30

Peso 2d - 1(g):	569,5	Peso 7d - 1(g):	573,0	Peso 28d - 1(g):	573,6
Peso 2d - 2(g):	572,1	Peso 7d - 2(g):	577,0	Peso 28d - 2(g):	574,1
Peso 2d - 3(g):	574,5	Peso 7d - 3(g):	579,2	Peso 28d - 3(g):	575,5
Peso 56d - 1(g):	570,0	Peso 90d - 1(g):	582,3	Peso 28d+cap - 1(g):	595,3
Peso 56d - 2(g):	567,3	Peso 90d - 2(g):	579,7	Peso 28d+cap - 2(g):	591,3
Peso 56d - 3(g):	566,7	Peso 90d - 3(g):	573,1	Peso 28d - 4-B(g):	592,0

Peso 28d - 1 - B(g): 570,5

Peso 28d - 2 - B(g): 570,0

Peso 28d - 3 - B(g): 570,9

Condicionamento de Provetes (Valor de Referência 20°C e 90%)

T (°C): 23 ; T água (°C): 19

HR (%): 73

**DIA 2 - Preparação dos provetes de ensaio**

Data de retirada de provetes: 8/6  
 Hora de retirada de provetes (tolerância  $\pm 30$ min.): 11h45

Peso 2d - 1(g): 574,9  
 Peso 2d - 2(g): 577,2  
 Peso 2d - 3(g): 579,6

**Ensaio de Ultra-sons**

	t ( $\mu$ s)	v(m/s)	t ( $\mu$ s)	v(m/s)	t ( $\mu$ s)	v(m/s)
2d-1	38,8	4120	38,7	4130		
2d-2	38,8	4120	39,0	4100		
2d-3	39,0	4100	38,9	4110		

Calibração: 20,0  $\mu$ s

**Resistência à Flexão**

Ff 2d-1 (kN): 3,6  
 Ff 2d-2 (kN): 3,8  
 Ff 2d-3 (kN): 4,1

**Resistência à Compressão**

Fc 2d-1' (kN): 44,5  
 Fc 2d-2' (kN): 44,0  
 Fc 2d-3' (kN): 46,0  
 Fc 2d-1'' (kN): 47,0  
 Fc 2d-2'' (kN): 43,5  
 Fc 2d-3'' (kN): 47,0

**DIA 7 - Preparação dos provetes de ensaio**

Data de retirada de provetes: 13/6  
 Hora de retirada de provetes (tolerância  $\pm 2$ h): 12h15

Peso 7d - 1(g): 578,3  
 Peso 7d - 2(g): 582,4  
 Peso 7d - 3(g): 584,7

**Ensaio de Ultra-sons**

	t ( $\mu$ s)	v(m/s)	t ( $\mu$ s)	v(m/s)	t ( $\mu$ s)	v(m/s)
7d-1	36,9	4340	36,9	4340		
7d-2	36,6	4370	36,7	4360		
7d-3	36,4	4400	36,4	4400		

Calibração: 20,0  $\mu$ s

**Resistência à Flexão**

Ff 7d-1 (kN): 4,7  
 Ff 7d-2 (kN): 4,9  
 Ff 7d-3 (kN): 5,7

**Resistência à Compressão**

Fc 7d-1' (kN): 65,5  
 Fc 7d-2' (kN): 64,5  
 Fc 7d-3' (kN): 64,0  
 Fc 7d-1'' (kN): 62,5  
 Fc 7d-2'' (kN): 65,0  
 Fc 7d-3'' (kN): 65,5

**DIA 28 - Preparação dos provetes de ensaio**

Data de retirada de provetes: 4/7

Hora de retirada de provetes (tolerância  $\pm 8h$ ): 13h05; 13h30

Peso 28d - 1(g): 582,4

Peso 28d - 2(g): 582,5

Peso 28d - 3(g): 583,8

Peso 28d - 1 - B(g): 579,7

Peso 28d - 2 - B(g): 578,8

Peso 28d - 3 - B(g): 579,8

Peso 28d - 4 - B(g): 600,7

**Ensaio de Ultra-sons**

	t ( $\mu s$ )	v(m/s)	t ( $\mu s$ )	v(m/s)	t ( $\mu s$ )	v(m/s)
28d-1	35,9	4460	35,9	4460		
28d-2	35,9	4460	35,9	4460		
28d-3	36,0	4440	36,0	4440		

Calibração: 20,1  $\mu s$ 

	t ( $\mu s$ )	v(m/s)	t ( $\mu s$ )	v(m/s)	t ( $\mu s$ )	v(m/s)
28d-1 - B	35,9	4460	36,1	4430		
28d-2 - B	36,2	4420	36,1	4430		
28d-3 - B	36,2	4420	36,2	4420		
28d-4 - B	36,0	4440	36,1	4430		

Calibração: 20,1  $\mu s$ **Resistência à Flexão**

Ff 28d-1 (kN): 5,9

Ff 28d-2 (kN): 5,4

Ff 28d-3 (kN): 4,8

Ff 28d-1 - B (kN): 6,0

Ff 28d-2 - B (kN): 4,8

Ff 28d-3 - B(kN): 6,4

Ff 28d-4 - B(kN): 5,3

**Resistência à Compressão**

Fc 28d-1' (kN): 76,0

Fc 28d-2' (kN): 77,0

Fc 28d-3' (kN): 76,0

Fc 28d-1' - B (kN): 75,0

Fc 28d-2' - B (kN): 75,0

Fc 28d-3' - B (kN): 75,0

Fc 28d-4' - B (kN): 76,0

Fc 28d-1'' (kN): 75,0

Fc 28d-2'' (kN): 77,0

Fc 28d-3'' (kN): 76,0

Fc 28d-1'' - B (kN): 76,0

Fc 28d-2'' - B (kN): 75,0

Fc 28d-3'' - B (kN): 73,5

Fc 28d-4'' - B (kN): 77,0

**Ensaio de Capilaridade**

Hora de retirada de provetes: 15H10

Peso 28d - cap 1(g): 604,21

Peso 28d - cap 2(g): 599,82

**DIA 42 - Preparação dos provetes de ensaio**

Data de retirada de provetes: 18/7

Hora de retirada de provetes: 8H25

Peso 28d - cap 1(g): 570,7

Peso 28d - cap 2(g): 566,6

**Ensaio de Capilaridade**

Hora de colocação dos provetes no aquário: 9h00

28d-cap 1	Data	Hora	Peso (g)	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)	d4 (cm)
5 min	18-Jul	9H05	571,11	2,50	0,65	0,60	0,50
10 min	18-Jul	9H10	571,23	2,50	0,65	0,60	0,50
15 min	18-Jul	9H15	571,34	1,65	0,65	0,60	0,50
30 min	18-Jul	9H30	571,75	1,90	0,65	0,80	0,50
1h	18-Jul	10H00	-			0,80	-
1h30	18-Jul	10H30	572,63	2,10	1,20	0,80	0,60
3h	18-Jul	12H00	573,57	2,10	2,00	0,80	1,00
6h	18-Jul	15H00	574,61	2,10	2,65	1,35	1,40
8h	18-Jul	17H00	575,17	2,10	2,00	1,35	1,40
12h	18-Jul	21H00	576,01	2,25	2,60	2,00	2,15
24h	19-Jul	21H00	578,03	2,25	3,90	2,95	3,15
48h	20-Jul	21H00	579,94	2,25	4,50	2,95	3,70
72h	21-Jul	21H00	581,44	2,25	4,50	4,15	3,70

28d-cap 2	Data	Hora	Peso (g)	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)	d4 (cm)
5 min	18-Jul	9H05	567,09	1,70	0,80	0,70	0,80
10 min	18-Jul	9H10	567,24	1,90	0,80	0,70	0,80
15 min	18-Jul	9H15	567,37	1,90	0,80	0,70	0,80
30 min	18-Jul	9H30	567,87	2,05	0,80	0,90	0,80
1h	18-Jul	10H00	-		0,80	-	
1h30	18-Jul	10H30	568,95	2,30	0,80	1,10	1,00
3h	18-Jul	12H00	570,13	2,65	1,15	1,10	1,30
6h	18-Jul	15H00	571,39	3,00	2,15	1,75	2,10
8h	18-Jul	17H00	572,06	3,00	2,15	1,75	2,10
12h	18-Jul	21H00	573,03	3,20	3,20	2,50	3,00
24h	19-Jul	21H00	575,20	3,20	4,00	2,85	3,00
48h	20-Jul	21H00	577,31	3,20	5,20	2,85	4,75
72h	21-Jul	21H00	578,81	3,20	5,75	2,85	4,75

**DIA 56 - Preparação dos provetes de ensaio**

Data de retirada de provetes: 1/8

Hora de retirada de provetes (tolerância  $\pm 8h$ ): 19h25

Peso 56d - 1 (g): 579,1

Peso 56d - 2 (g): 576,0

Peso 56d - 3 (g): 575,3

**Ensaio de Ultra-sons**

	t ( $\mu s$ )	v(m/s)	t ( $\mu s$ )	v(m/s)	t ( $\mu s$ )	v(m/s)
56d-1	35,8	4470	35,7	4480		
56d-2	35,8	4470	36,0	4440		
56d-3	35,8	4470	35,9	4460		

Calibração: 20,0  $\mu s$ **Resistência à Flexão**

Ff 56d-1 (kN): 5,2

Ff 56d-2 (kN): 5,3

Ff 56d-3 (kN): 5,0

**Resistência à Compressão**

Fc 56d-1' (kN): 83,0

Fc 56d-2' (kN): 81,0

Fc 56d-3' (kN): 80,5

Fc 56d-1'' (kN): 83,0

Fc 56d-2'' (kN): 82,0

Fc 56d-3'' (kN): 79,0

**DIA 90 - Preparação dos provetes de ensaio**

Data de retirada de provetes: 4/9

Hora de retirada de provetes (tolerância  $\pm 8h$ ): 17h50

Peso 90d - 1 (g): 592,9

Peso 90d - 2 (g): 590,0

Peso 90d - 3 (g): 583,3

**Ensaio de Ultra-sons**

	t ( $\mu s$ )	v(m/s)	t ( $\mu s$ )	v(m/s)	t ( $\mu s$ )	v(m/s)
90d-1	35,9	4460	35,8	4470		
90d-2	35,6	4490	35,7	4480		
90d-3	35,4	4520	35,4	4520		

Calibração: 20,1  $\mu s$ **Resistência à Flexão**

Ff 90d-1 (kN): 6,4

Ff 90d-2 (kN): 6,0

Ff 90d-3 (kN): 6,0

**Resistência à Compressão**

Fc 90d-1' (kN): 88,0

Fc 90d-2' (kN): 85,0

Fc 90d-3' (kN): 86,0

Fc 90d-1'' (kN): 85,5

Fc 90d-2'' (kN): 83,0

Fc 90d-3'' (kN): 88,0



### C.3 – REPETIBILIDADE ENTRE AS DUAS AMASSADURAS CORRESPONDENTES A CADA MISTURA

Família	Mistura	Coeficiente de variação (%)					
		antes da exclusão do provete			após a exclusão do provete		
		1ª Amassadura	2ª Amassadura	Global	1ª Amassadura	2ª Amassadura	Global
Referência	100C(CEN)	1,0	1,4	1,3	1,0	1,1	1,0
	100C	1,4	2,7	2,2	1,4	1,7	1,9
	100C(+SP)	1,9	1,5	2,7	1,9	1,7	2,2
Misturas binárias	95C+5FCC(+SP)	1,6	1,1	1,3	1,6	1,1	1,3
	90C+10FCC(+SP)	2,0	1,5	2,0	2,0	1,1	2,0
	85C+15FCC(+SP)	3,4	6,4	5,2	3,4	2,8	3,0
	95C+5rPC(+SP)	2,9	2,9	3,5	2,9	1,7	2,7
	90C+10rPC(+SP)	1,6	1,7	1,6	1,6	1,3	1,4
	85C+15rPC(+SP)	0,9	2,4	2,8	0,9	2,3	2,5
	80C+20rPC(+SP)	3,1	2,8	2,9	3,1	1,6	2,4
	75C+25rPC(+SP)	2,7	3,9	3,7	2,7	3,8	3,3
	70C+30rPC(+SP)	1,2	4,3	3,9	1,2	3,9	3,1
	Misturas ternárias	80C+5FCC+15rPC(+SP)	1,9	2,5	2,7	1,9	1,5
80C+10FCC+10rPC(+SP)		3,0	2,4	2,5	3,0	1,7	2,4
80C+15FCC+5rPC(+SP)		1,5	1,9	1,8	1,5	1,6	1,5
75C+5FCC+20rPC(+SP)		2,6	3,4	3,2	2,6	3,1	2,8
75C+10FCC+15rPC(+SP)		1,7	2,5	2,2	1,7	2,8	2,3
75C+15FCC+10rPC(+SP)		1,0	1,7	2,4	1,0	1,7	2,2
70C+5FCC+25rPC(+SP)		2,2	2,0	2,0	2,2	1,2	1,7
70C+10FCC+20rPC(+SP)		1,6	1,5	1,9	1,6	1,4	1,7
70C+15FCC+15rPC(+SP)		1,5	5,6	4,3	1,5	1,3	1,5

No quadro anterior apresenta-se o coeficiente de variação dos valores de tensão de rotura à compressão, avaliados em provetes prismáticos aos 28 dias de idade, na 1ª e 2ª amassadura sendo, também, apresentado o coeficiente de variação global (entre ambas as amassaduras) para todas as misturas antes da exclusão do provete, cujo valor de resistência à compressão apresentava no maior desvio-padrão em relação à média, e após a exclusão desse provete.

Observa-se, no geral, que mesmo antes da exclusão do provete se obtiveram coeficientes de variação aceitáveis, tendo em consideração o cariz da dissertação. No entanto, de modo a homogeneizar o tratamento de dados, optou-se, para todos os casos, pela exclusão do provete, de entre os sete provetes sujeitos ao ensaio de resistência mecânica, que apresentava maior desvio em relação à média.



**MISTURA 100 C (CEN)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1800g  
Água destilada - 900g  
Areia CEN - 5400g

Dosagem: 4 doses

Data (1ª Amassadura): 6/6

Data (2ª Amassadura): 6/6

Hora - "tempo zero"(1ª Amassadura): 8h20

Hora - "tempo zero"(2ª Amassadura): 9h20

**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm) 160

Massa Volúmica (kg/m<sup>3</sup>) 2200

Teor de Ar contido na argamassa (%) 5,7

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d) t (µs) 38,73 v(m/s) 4130

Resistência à Flexão (2d) F<sub>f</sub> (kN) 3,1 R<sub>f</sub> (MPa) 7,3

Resistência à Compressão (2d) F<sub>c</sub> (kN) 40,3 R<sub>c</sub> (MPa) 25,2

Ensaio de Ultra-sons (7d) t (µs) 36,72 v(m/s) 4358

Resistência à Flexão (7d) F<sub>f</sub> (kN) 4,2 R<sub>f</sub> (MPa) 9,8

Resistência à Compressão (7d) F<sub>c</sub> (kN) 58,4 R<sub>c</sub> (MPa) 36,5

Ensaio de Ultra-sons (28d) t (µs) 35,58 v(m/s) 4498

Resistência à Flexão (28d) F<sub>f</sub> (kN) 5,0 R<sub>f</sub> (MPa) 11,8

Resistência à Compressão (28d) F<sub>c</sub> (kN) 75,4 R<sub>c</sub> (MPa) 47,1

Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>) 0,20

Ensaio de Ultra-sons (56d) t (µs) 35,17 v(m/s) 4552

Resistência à Flexão (56d) F<sub>f</sub> (kN) 4,9 R<sub>f</sub> (MPa) 11,6

Resistência à Compressão (56d) F<sub>c</sub> (kN) 80,5 R<sub>c</sub> (MPa) 50,3

Ensaio de Ultra-sons (90d) t (µs) 36,22 v(m/s) 4418

Resistência à Flexão (90d) F<sub>f</sub> (kN) 5,2 R<sub>f</sub> (MPa) 12,1

Resistência à Compressão (90d) F<sub>c</sub> (kN) 83,0 R<sub>c</sub> (MPa) 51,9

**MISTURA 100C(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1800g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses

**Data (1ª Amassadura):** 25/4

**Hora - "tempo zero" (1ª Amassadura):** 08h50

**Data (2ª Amassadura):** 25/4

**Hora - "tempo zero" (2ª Amassadura):** 09h52

**Estado Fresco**

**Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)** 200

**Massa Volúmica (kg/m<sup>3</sup>)** 2235

**Teor de Ar contido na argamassa (%)** 4,9

**Estado Endurecido**

**Ensaio de Ultra-sons (2d)** t (µs) 38,63 v(m/s) 4142

**Resistência à Flexão (2d)** F<sub>f</sub> (kN) 3,9 R<sub>f</sub> (MPa) 9,1

**Resistência à Compressão (2d)** F<sub>c</sub> (kN) 54,1 R<sub>c</sub> (MPa) 33,8

**Ensaio de Ultra-sons (7d)** t (µs) 36,58 v(m/s) 4373

**Resistência à Flexão (7d)** F<sub>f</sub> (kN) 4,6 R<sub>f</sub> (MPa) 10,9

**Resistência à Compressão (7d)** F<sub>c</sub> (kN) 69,2 R<sub>c</sub> (MPa) 43,2

**Ensaio de Ultra-sons (28d)** t (µs) 36,10 v(m/s) 4431

**Resistência à Flexão (28d)** F<sub>f</sub> (kN) 5,3 R<sub>f</sub> (MPa) 12,5

**Resistência à Compressão (28d)** F<sub>c</sub> (kN) 90,3 R<sub>c</sub> (MPa) 56,5

**Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>)** 0,09

**Ensaio de Ultra-sons (56d)** t (µs) 36,17 v(m/s) 4423

**Resistência à Flexão (56d)** F<sub>f</sub> (kN) 6,1 R<sub>f</sub> (MPa) 14,4

**Resistência à Compressão (56d)** F<sub>c</sub> (kN) 92,4 R<sub>c</sub> (MPa) 57,8

**Ensaio de Ultra-sons (90d)** t (µs) 35,70 v(m/s) 4480

**Resistência à Flexão (90d)** F<sub>f</sub> (kN) 5,5 R<sub>f</sub> (MPa) 12,9

**Resistência à Compressão (90d)** F<sub>c</sub> (kN) 97,2 R<sub>c</sub> (MPa) 60,7

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 500g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose

**Data:** 18/5

**Hora:** 17h00

**Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)** 122

**Início de Presa** 4:46:26:00

**Fim de Presa** 5:46:26:00

**MISTURA 95C+5FCC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1710g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 90g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

Dosagem: 4 doses

Data (1ªAmassadura): 25/4

Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura): 11h05

Data (2ªAmassadura): 25/4

Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura): 12h00

**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm) 193

Massa Volúmica (kg/m<sup>3</sup>) 2219

Teor de Ar contido na argamassa (%) 5,0

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d) t (µs) 40,07 v(m/s) 3993

Resistência à Flexão (2d) F<sub>f</sub> (kN) 3,8 R<sub>f</sub> (MPa) 8,8

Resistência à Compressão (2d) F<sub>c</sub> (kN) 46,6 R<sub>c</sub> (MPa) 29,1

Ensaio de Ultra-sons (7d) t (µs) 37,23 v(m/s) 4297

Resistência à Flexão (7d) F<sub>f</sub> (kN) 5,2 R<sub>f</sub> (MPa) 12,2

Resistência à Compressão (7d) F<sub>c</sub> (kN) 71,8 R<sub>c</sub> (MPa) 44,9

Ensaio de Ultra-sons (28d) t (µs) 36,31 v(m/s) 4408

Resistência à Flexão (28d) F<sub>f</sub> (kN) 5,8 R<sub>f</sub> (MPa) 13,6

Resistência à Compressão (28d) F<sub>c</sub> (kN) 95,5 R<sub>c</sub> (MPa) 59,7

Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>) 0,10

Ensaio de Ultra-sons (56d) t (µs) 35,52 v(m/s) 4507

Resistência à Flexão (56d) F<sub>f</sub> (kN) 6,0 R<sub>f</sub> (MPa) 14,1

Resistência à Compressão (56d) F<sub>c</sub> (kN) 98,1 R<sub>c</sub> (MPa) 61,3

Ensaio de Ultra-sons (90d) t (µs) #DIV/0! v(m/s) #DIV/0!

Resistência à Flexão (90d) F<sub>f</sub> (kN) 6,4 R<sub>f</sub> (MPa) 15,0

Resistência à Compressão (90d) F<sub>c</sub> (kN) 102,3 R<sub>c</sub> (MPa) 64,0

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 475g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 25g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

Dosagem: 1 dose

Data: 19/5

Hora: 13H00

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g) 130

Início de Presa 4:24:07:00

Fim de Presa 5:04:07:00

**MISTURA 90C+10FCC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1620g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 180g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

Dosagem: 4 doses

Data (1ª Amassadura): 26/4

Hora - "tempo zero"(1ª Amassadura): 15h14

Data (2ª Amassadura): 26/4

Hora - "tempo zero"(2ª Amassadura): 16h30

**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	175
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2158
Teor de Ar contido na argamassa (%)	5,8

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	40,35	v(m/s)	3965
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,6	R <sub>f</sub> (MPa)	8,4
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	42,1	R <sub>c</sub> (MPa)	26,3
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	37,17	v(m/s)	4303
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,4	R <sub>f</sub> (MPa)	10,3
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	78,3	R <sub>c</sub> (MPa)	48,9
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	36,33	v(m/s)	4405
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,2	R <sub>f</sub> (MPa)	12,3
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	96,3	R <sub>c</sub> (MPa)	60,2
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )				0,16
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	35,47	v(m/s)	4512
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,0	R <sub>f</sub> (MPa)	11,6
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	101,5	R <sub>c</sub> (MPa)	63,4
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	35,70	v(m/s)	4480
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,1	R <sub>f</sub> (MPa)	12,0
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	105,0	R <sub>c</sub> (MPa)	65,6

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 450g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 50g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

Dosagem: 1 dose

Data: 19/5

Hora: 14h00

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	136
Índice de Presa	3:47:22:00
Fim de Presa	4:57:22:00

**MISTURA 85C+15FCC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1530g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 270g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses

**Data (1ª Amassadura):** 20/4

**Hora - "tempo zero"(1ª Amassadura):** 17h43

**Data (2ª Amassadura):** 6/6

**Hora - "tempo zero"(2ª Amassadura):** 16H00

**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	161
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2126
Teor de Ar contido na argamassa (%)	6,2

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	43,83	v(m/s)	3650
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,0	R <sub>f</sub> (MPa)	7,1
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	31,6	R <sub>c</sub> (MPa)	19,7
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	39,67	v(m/s)	4033
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,7	R <sub>f</sub> (MPa)	8,7
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	53,6	R <sub>c</sub> (MPa)	33,5
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	36,81	v(m/s)	4345
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,7	R <sub>f</sub> (MPa)	11,0
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	86,1	R <sub>c</sub> (MPa)	53,8
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )				0,18
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	36,17	v(m/s)	4423
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,4	R <sub>f</sub> (MPa)	12,7
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	94,8	R <sub>c</sub> (MPa)	59,3
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	35,85	v(m/s)	4465
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,4	R <sub>f</sub> (MPa)	12,7
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	102,5	R <sub>c</sub> (MPa)	64,1

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 425g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 75g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose

**Data:** 19/5

**Hora:** 9h35

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	142
Ínicio de Presa	3:21:40:00
Fim de Presa	4:21:40:00



**MISTURA 90C+10rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1620g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 180g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses

**Data (1ª Amassadura):** 6/5

**Hora - "tempo zero"(1ª Amassadura):** 23h09

**Data (2ª Amassadura):** 27/4

**Hora - "tempo zero"(2ª Amassadura):** 12h10

**Estado Fresco**

**Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)** 223

**Massa Volúmica (kg/m<sup>3</sup>)** 2134

**Teor de Ar contido na argamassa (%)** 8,1

**Estado Endurecido**

**Ensaio de Ultra-sons (2d)** t (µs) 38,45 v(m/s) 4162

**Resistência à Flexão (2d)** F<sub>f</sub> (kN) 3,6 R<sub>f</sub> (MPa) 8,4

**Resistência à Compressão (2d)** F<sub>c</sub> (kN) 43,8 R<sub>c</sub> (MPa) 27,3

**Ensaio de Ultra-sons (7d)** t (µs) 37,05 v(m/s) 4315

**Resistência à Flexão (7d)** F<sub>f</sub> (kN) 4,5 R<sub>f</sub> (MPa) 10,4

**Resistência à Compressão (7d)** F<sub>c</sub> (kN) 61,5 R<sub>c</sub> (MPa) 38,4

**Ensaio de Ultra-sons (28d)** t (µs) 36,26 v(m/s) 4414

**Resistência à Flexão (28d)** F<sub>f</sub> (kN) 4,9 R<sub>f</sub> (MPa) 11,5

**Resistência à Compressão (28d)** F<sub>c</sub> (kN) 73,4 R<sub>c</sub> (MPa) 45,9

**Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>)** 0,15

**Ensaio de Ultra-sons (56d)** t (µs) 35,97 v(m/s) 4450

**Resistência à Flexão (56d)** F<sub>f</sub> (kN) 4,9 R<sub>f</sub> (MPa) 11,4

**Resistência à Compressão (56d)** F<sub>c</sub> (kN) 78,0 R<sub>c</sub> (MPa) 48,8

**Ensaio de Ultra-sons (90d)** t (µs) 36,08 v(m/s) 4433

**Resistência à Flexão (90d)** F<sub>f</sub> (kN) 4,9 R<sub>f</sub> (MPa) 11,4

**Resistência à Compressão (90d)** F<sub>c</sub> (kN) 77,6 R<sub>c</sub> (MPa) 48,5

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 450g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 50g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose

**Data:** 20/5

**Hora:** 15h10

**Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)** 116

**Início de Presa** 3:36:10:00

**Fim de Presa** 4:46:10:00

**MISTURA 85C+15rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1530g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 270g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses

**Data (1ªAmassadura):** 27/4

**Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura):** 17h05

**Data (2ªAmassadura):** 27/4

**Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura):** 18h10

**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	223
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2105
Teor de Ar contido na argamassa (%)	7,8

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	39,95	v(m/s)	4005
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,3	R <sub>f</sub> (MPa)	7,7
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	39,3	R <sub>c</sub> (MPa)	24,5
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	37,47	v(m/s)	4270
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,3	R <sub>f</sub> (MPa)	10,0
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	62,1	R <sub>c</sub> (MPa)	38,8
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	37,08	v(m/s)	4315
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,0	R <sub>f</sub> (MPa)	11,6
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	70,8	R <sub>c</sub> (MPa)	44,3
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )				0,17
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	36,25	v(m/s)	4415
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,2	R <sub>f</sub> (MPa)	12,1
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	72,8	R <sub>c</sub> (MPa)	45,5
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	36,60	v(m/s)	4378
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,2	R <sub>f</sub> (MPa)	12,3
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	74,2	R <sub>c</sub> (MPa)	46,4

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 425g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 75g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose

**Data:** 20/5

**Hora:** 14h00

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	113
Início de Presa	2:55:54:00
Fim de Presa	4:25:54:00

**MISTURA 80C+20rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1440g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 360g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses

**Data (1ªAmassadura):** 28/4

**Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura):** 10h40

**Data (2ªAmassadura):** 28/4

**Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura):** 11h45

**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	219
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2073
Teor de Ar contido na argamassa (%)	4,0

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	41,22	v(m/s)	3878
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	2,8	R <sub>f</sub> (MPa)	6,4
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	31,0	R <sub>c</sub> (MPa)	19,4
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	38,28	v(m/s)	4182
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,8	R <sub>f</sub> (MPa)	8,9
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	52,3	R <sub>c</sub> (MPa)	32,7
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	37,36	v(m/s)	4284
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,9	R <sub>f</sub> (MPa)	9,2
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	61,2	R <sub>c</sub> (MPa)	38,2
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )				0,19
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	37,53	v(m/s)	4267
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,7	R <sub>f</sub> (MPa)	11,0
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	63,7	R <sub>c</sub> (MPa)	39,8
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	37,25	v(m/s)	4295
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,5	R <sub>f</sub> (MPa)	10,5
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	65,5	R <sub>c</sub> (MPa)	40,9

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 400g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 100g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose

**Data:** 20/5

**Hora:** 12h10

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	111
Ínicio de Presa	2:46:32:00
Fim de Presa	4:26:32:00

MISTURA 75C+25rPC(+SP)				
<b>Preparação da Argamassa</b>				
<b>Composição:</b> CEM I 42,5 R - 1350g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 450g Água destilada - 900g (600+300) Areia - 5400g SikaPlast 898: 9g (0,5%)				
<b>Dosagem:</b> 4 doses				
<b>Data (1ªAmassadura):</b> 6/5		<b>Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura):</b> 10h40		
<b>Data (2ªAmassadura):</b> 6/5		<b>Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura):</b> 12h05		
<b>Estado Fresco</b>				
<b>Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)</b>			238	
<b>Massa Volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>			2094	
<b>Teor de Ar contido na argamassa (%)</b>			11,0	
<b>Estado Endurecido</b>				
<b>Ensaio de Ultra-sons (2d)</b>	<b>t (µs)</b>	40,38	<b>v(m/s)</b>	3962
<b>Resistência à Flexão (2d)</b>	<b>F<sub>f</sub> (kN)</b>	2,6	<b>R<sub>f</sub> (MPa)</b>	6,0
<b>Resistência à Compressão (2d)</b>	<b>F<sub>c</sub> (kN)</b>	32,8	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	20,5
<b>Ensaio de Ultra-sons (7d)</b>	<b>t (µs)</b>	38,80	<b>v(m/s)</b>	4120
<b>Resistência à Flexão (7d)</b>	<b>F<sub>f</sub> (kN)</b>	3,6	<b>R<sub>f</sub> (MPa)</b>	8,4
<b>Resistência à Compressão (7d)</b>	<b>F<sub>c</sub> (kN)</b>	46,3	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	29,0
<b>Ensaio de Ultra-sons (28d)</b>	<b>t (µs)</b>	38,13	<b>v(m/s)</b>	4198
<b>Resistência à Flexão (28d)</b>	<b>F<sub>f</sub> (kN)</b>	4,0	<b>R<sub>f</sub> (MPa)</b>	9,3
<b>Resistência à Compressão (28d)</b>	<b>F<sub>c</sub> (kN)</b>	54,1	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	33,8
<b>Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>)</b>			0,22	
<b>Ensaio de Ultra-sons (56d)</b>	<b>t (µs)</b>	37,48	<b>v(m/s)</b>	4272
<b>Resistência à Flexão (56d)</b>	<b>F<sub>f</sub> (kN)</b>	4,5	<b>R<sub>f</sub> (MPa)</b>	10,6
<b>Resistência à Compressão (56d)</b>	<b>F<sub>c</sub> (kN)</b>	58,0	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	36,3
<b>Ensaio de Ultra-sons (90d)</b>	<b>t (µs)</b>	37,40	<b>v(m/s)</b>	4280
<b>Resistência à Flexão (90d)</b>	<b>F<sub>f</sub> (kN)</b>	4,4	<b>R<sub>f</sub> (MPa)</b>	10,4
<b>Resistência à Compressão (90d)</b>	<b>F<sub>c</sub> (kN)</b>	58,8	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	36,8
<b>Preparação da Pasta</b>				
<b>Composição:</b> CEM I 42,5 R - 375g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 125g SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)				
<b>Dosagem:</b> 1 dose				
<b>Data:</b> 20/6		<b>Hora:</b> 11h00		
<b>Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)</b>				111
<b>Íncio de Presa</b>				02:36:01:00
<b>Fim de Presa</b>				03:36:01:00

MISTURA 70C+30rPC(+SP)				
<b>Preparação da Argamassa</b>				
<b>Composição:</b> CEM I 42,5 R - 1260g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 540g Água destilada - 900g (600+300) Areia - 5400g SikaPlast 898: 9g (0,5%)				
<b>Dosagem:</b> 4 doses <b>Data (1ª Amassadura):</b> 6/5 <b>Data (2ª Amassadura):</b> 6/5				
<b>Hora - "tempo zero"(1ª Amassadura):</b> 15h30 <b>Hora - "tempo zero"(2ª Amassadura):</b> 18h15				
<b>Estado Fresco</b>				
Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	239			
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2100			
Teor de Ar contido na argamassa (%)	12,5			
<b>Estado Endurecido</b>				
Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	41,87	v(m/s)	3823
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	1,6	R <sub>f</sub> (MPa)	3,8
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	25,9	R <sub>c</sub> (MPa)	16,2
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	39,90	v(m/s)	4012
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,3	R <sub>f</sub> (MPa)	7,7
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	41,8	R <sub>c</sub> (MPa)	26,1
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	38,84	v(m/s)	4118
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,7	R <sub>f</sub> (MPa)	8,7
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	50,8	R <sub>c</sub> (MPa)	31,7
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )				0,21
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	37,90	v(m/s)	4220
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,0	R <sub>f</sub> (MPa)	9,5
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	52,8	R <sub>c</sub> (MPa)	33,0
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	38,15	v(m/s)	4193
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,0	R <sub>f</sub> (MPa)	9,3
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	51,7	R <sub>c</sub> (MPa)	32,3
<b>Preparação da Pasta</b>				
<b>Composição:</b> CEM I 42,5 R - 350g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 150g SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)				
<b>Dosagem:</b> 1 dose <b>Data:</b> 20/5 <b>Hora:</b> 9h45				
Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)				109
Início de Presa				02:36:41:00
Fim de Presa				03:46:41:00

**MISTURA 80C+5FCC+15rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1440g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 270g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 90g  
Água destilada - 900g (600+300)  
Areia - 5400g  
SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses**Data (1ªAmassadura):** 28/4**Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura):** 17h35**Data (2ªAmassadura):** 28/4**Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura):** 19h30**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	195
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2064
Teor de Ar contido na argamassa (%)	11,0

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	42,02	v(m/s)	3808
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	2,3	R <sub>f</sub> (MPa)	5,4
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	28,8	R <sub>c</sub> (MPa)	18,0
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	38,27	v(m/s)	4183
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,6	R <sub>f</sub> (MPa)	8,3
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	52,9	R <sub>c</sub> (MPa)	33,1
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	37,77	v(m/s)	4237
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,1	R <sub>f</sub> (MPa)	9,5
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	62,7	R <sub>c</sub> (MPa)	39,2
Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )				0,18
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	37,08	v(m/s)	4315
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,7	R <sub>f</sub> (MPa)	11,0
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	65,8	R <sub>c</sub> (MPa)	41,1
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	37,48	v(m/s)	4270
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,7	R <sub>f</sub> (MPa)	11,0
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	65,7	R <sub>c</sub> (MPa)	41,0

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 400g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 75g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 25g  
SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose**Data:** 27/5**Hora:** 10h00

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	117
Íncio de Presa	02:36:07:00
Fim de Presa	04:06:07:00

**MISTURA 80C+10FCC+10rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1440g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 180g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 180g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses**Data (1ªAmassadura):** 2/5**Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura):** 8h40**Data (2ªAmassadura):** 2/5**Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura):** 9h55**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	184
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2083
Teor de Ar contido na argamassa (%)	8,9

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	42,40	v(m/s)	3775
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,1	R <sub>f</sub> (MPa)	7,2
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	36,3	R <sub>c</sub> (MPa)	22,7
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	38,67	v(m/s)	4140
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,8	R <sub>f</sub> (MPa)	8,9
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	55,0	R <sub>c</sub> (MPa)	34,4
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	37,09	v(m/s)	4315
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,7	R <sub>f</sub> (MPa)	11,0
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	71,6	R <sub>c</sub> (MPa)	44,8
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )				0,21
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	37,57	v(m/s)	4263
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,1	R <sub>f</sub> (MPa)	11,9
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	76,6	R <sub>c</sub> (MPa)	47,9
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	36,58	v(m/s)	4373
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,7	R <sub>f</sub> (MPa)	10,9
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	78,6	R <sub>c</sub> (MPa)	49,1

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 400g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 50g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 50g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose**Data:** 27/5**Hora:** 12h00

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	126
Início de Presa	02:45:38:00
Fim de Presa	03:35:00:00

**MISTURA 80C+15FCC+5rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1440g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 90g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 270g  
Água destilada - 900g (600+300)  
Areia - 5400g  
SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 Doses

Data (1ª Amassadura): 2/5

Hora - "tempo zero"(1ª Amassadura): 12h15

Data (2ª Amassadura): 2/5

Hora - "tempo zero"(2ª Amassadura): 14h15

**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	152
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2090
Teor de Ar contido na argamassa (%)	8,4

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	42,82	v(m/s)	3738
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	2,3	R <sub>f</sub> (MPa)	5,3
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	33,7	R <sub>c</sub> (MPa)	21,0
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	38,78	v(m/s)	4122
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,9	R <sub>f</sub> (MPa)	9,1
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	58,2	R <sub>c</sub> (MPa)	36,4
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	38,09	v(m/s)	4199
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,8	R <sub>f</sub> (MPa)	11,2
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	81,0	R <sub>c</sub> (MPa)	50,7
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )		0,21		
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	37,52	v(m/s)	4265
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,5	R <sub>f</sub> (MPa)	10,6
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	83,2	R <sub>c</sub> (MPa)	52,0
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	36,94	v(m/s)	4333
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	5,0	R <sub>f</sub> (MPa)	11,6
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	84,9	R <sub>c</sub> (MPa)	53,1

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 400g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 75g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 25g  
SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose

Data: 27/5

Hora: 15h00

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	135
Íncio de Presa	02:55:39:00
Fim de Presa	03:55:39:00

**MISTURA 75C+5FCC+20rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1350g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 360g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 90g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses**Data (1ªAmassadura):** 3/5**Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura):** 10h55**Data (1ªAmassadura):** 3/5**Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura):** 12h10**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	212
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2013
Teor de Ar contido na argamassa (%)	13,5

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	42,35	v(m/s)	3778
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	2,0	R <sub>f</sub> (MPa)	4,8
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	30,1	R <sub>c</sub> (MPa)	18,8
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	39,95	v(m/s)	4005
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,6	R <sub>f</sub> (MPa)	8,3
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	47,5	R <sub>c</sub> (MPa)	29,7
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	37,80	v(m/s)	4236
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,1	R <sub>f</sub> (MPa)	9,6
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	55,9	R <sub>c</sub> (MPa)	34,9
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )				0,29
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	37,73	v(m/s)	4240
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,6	R <sub>f</sub> (MPa)	10,8
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	59,7	R <sub>c</sub> (MPa)	37,3
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	37,98	v(m/s)	4213
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,0	R <sub>f</sub> (MPa)	9,3
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	57,9	R <sub>c</sub> (MPa)	36,2

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 375g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 100g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 25g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose**Data:** 27/5**Hora:** 12h50

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	117
Íncio de Presa	03:11:20:00
Fim de Presa	04:26:20:00

**MISTURA 75C+10FCC+15rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1350g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 270g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 180g  
Água destilada - 900g (600+300)  
Areia - 5400g  
SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses**Data (1ªAmassadura):** 7/5**Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura):** 21h17**Data (1ªAmassadura):** 3/5**Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura):** 17h40**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	180
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2032
Teor de Ar contido na argamassa (%)	9,5

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	43,15	v(m/s)	3705
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	1,9	R <sub>f</sub> (MPa)	4,4
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	28,4	R <sub>c</sub> (MPa)	17,8
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	40,67	v(m/s)	3938
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,1	R <sub>f</sub> (MPa)	7,1
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	42,3	R <sub>c</sub> (MPa)	26,5
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	38,41	v(m/s)	4168
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,1	R <sub>f</sub> (MPa)	9,7
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	62,3	R <sub>c</sub> (MPa)	38,9
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )		0,21		
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	37,47	v(m/s)	4273
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,5	R <sub>f</sub> (MPa)	10,6
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	64,9	R <sub>c</sub> (MPa)	40,6
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	37,68	v(m/s)	4248
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,5	R <sub>f</sub> (MPa)	10,6
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	68,4	R <sub>c</sub> (MPa)	42,8

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 375g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 75g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 50g  
SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose**Data:** 27/5**Hora:** 14h50

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	125
Início de Presa	02:55:39:00
Fim de Presa	03:45:39:00

MISTURA 75C+15FCC+10rPC(+SP)				
<b>Preparação da Argamassa</b>				
<b>Composição:</b> CEM I 42,5 R - 1350g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 180g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 270g Água destilada - 900g (600+300) Areia - 5400g SikaPlast 898: 9g (0,5%) <b>Dosagem:</b> 4 doses <b>Data (1ªAmassadura):</b> 4/5 <b>Data (1ªAmassadura):</b> 4/5 <b>Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura):</b> 9h15 <b>Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura):</b> 10h25				
<b>Estado Fresco</b>				
Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	163			
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2061			
Teor de Ar contido na argamassa (%)	11,0			
<b>Estado Endurecido</b>				
Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	43,08	v(m/s)	3712
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	1,7	R <sub>f</sub> (MPa)	3,9
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	27,0	R <sub>c</sub> (MPa)	16,9
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	40,68	v(m/s)	3932
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,4	R <sub>f</sub> (MPa)	8,0
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	50,8	R <sub>c</sub> (MPa)	31,7
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	37,79	v(m/s)	4236
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,3	R <sub>f</sub> (MPa)	10,1
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	68,6	R <sub>c</sub> (MPa)	42,9
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	0,15			
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	37,03	v(m/s)	4318
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,4	R <sub>f</sub> (MPa)	10,2
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	74,6	R <sub>c</sub> (MPa)	46,6
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	36,98	v(m/s)	4325
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,3	R <sub>f</sub> (MPa)	10,0
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	72,5	R <sub>c</sub> (MPa)	45,3
<b>Preparação da Pasta</b>				
<b>Composição:</b> CEM I 42,5 R - 375g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 50g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 75g SikaPlast 898: 2,5g (0,5%) <b>Dosagem:</b> 1 dose <b>Data:</b> 28/5 <b>Hora:</b> 9H15				
Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	132			
Ínicio de Presa	02:26:23:00			
Fim de Presa	03:36:23:00			

**MISTURA 70C+5FCC+25rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1260g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 450g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 90g  
Água destilada - 900g (600+300)  
Areia - 5400g  
SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses**Data (1ª Amassadura):** 4/5**Hora - "tempo zero"(1ª Amassadura):** 16h35**Data (1ª Amassadura):** 4/5**Hora - "tempo zero"(2ª Amassadura):** 19h00**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	218
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2021
Teor de Ar contido na argamassa (%)	9,9

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	42,48	v(m/s)	3770
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	1,6	R <sub>f</sub> (MPa)	3,8
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	26,0	R <sub>c</sub> (MPa)	16,3
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	39,97	v(m/s)	4003
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,0	R <sub>f</sub> (MPa)	6,9
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	41,6	R <sub>c</sub> (MPa)	26,0
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	39,34	v(m/s)	4067
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,4	R <sub>f</sub> (MPa)	8,1
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	51,2	R <sub>c</sub> (MPa)	32,0
Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	0,14			
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	38,05	v(m/s)	4205
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,2	R <sub>f</sub> (MPa)	9,7
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	54,9	R <sub>c</sub> (MPa)	34,3
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	37,92	v(m/s)	4218
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,9	R <sub>f</sub> (MPa)	9,2
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	56,3	R <sub>c</sub> (MPa)	35,2

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 350g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 125g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 25g  
SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose**Data:** 28/5**Hora:** 11h40

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	115
Íncio de Presa	02:56:20:00
Fim de Presa	03:56:20:00

**MISTURA 70C+10FCC+20rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1260g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 360g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 180g  
Água destilada - 900g (600+300)  
Areia - 5400g  
SikaPlast 898: 9g (0,5%)

**Dosagem:** 4 doses**Data (1ªAmassadura):** 5/5**Hora - "tempo zero"(1ªAmassadura):** 14h25**Data (1ªAmassadura):** 5/5**Hora - "tempo zero"(2ªAmassadura):** 15h50**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	185
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2000
Teor de Ar contido na argamassa (%)	13,5

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	44,25	v(m/s)	3617
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	2,2	R <sub>f</sub> (MPa)	5,2
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	23,9	R <sub>c</sub> (MPa)	14,9
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	41,85	v(m/s)	3825
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	2,6	R <sub>f</sub> (MPa)	6,0
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	37,3	R <sub>c</sub> (MPa)	23,3
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	38,57	v(m/s)	4144
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,9	R <sub>f</sub> (MPa)	9,2
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	52,7	R <sub>c</sub> (MPa)	33,0
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )				0,14
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	38,30	v(m/s)	4180
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,3	R <sub>f</sub> (MPa)	10,0
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	61,3	R <sub>c</sub> (MPa)	38,3
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	38,27	v(m/s)	4183
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,9	R <sub>f</sub> (MPa)	9,1
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	57,1	R <sub>c</sub> (MPa)	35,7

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 350g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 100g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 50g  
SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

**Dosagem:** 1 dose**Data:** 28/5**Hora:** 13h15

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	121
Íncio de Presa	02:26:11:00
Fim de Presa	03:31:11:00

**MISTURA 70C+15FCC+15rPC(+SP)****Preparação da Argamassa****Composição:**

CEM I 42,5 R - 1260g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 270g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 270g  
 Água destilada - 900g (600+300)  
 Areia - 5400g  
 SikaPlast 898: 9g (0,5%)

Dosagem: 4 doses

Data (1ª Amassadura): 5/5

Hora - "tempo zero"(1ª Amassadura): 18h05

Data (1ª Amassadura): 5/5

Hora - "tempo zero"(2ª Amassadura): 20h00

**Estado Fresco**

Mesa de Espalhamento - diâmetro médio (mm)	175
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2008
Teor de Ar contido na argamassa (%)	10,5

**Estado Endurecido**

Ensaio de Ultra-sons (2d)	t (µs)	44,93	v(m/s)	3565
Resistência à Flexão (2d)	F <sub>f</sub> (kN)	1,3	R <sub>f</sub> (MPa)	2,9
Resistência à Compressão (2d)	F <sub>c</sub> (kN)	21,6	R <sub>c</sub> (MPa)	13,5
Ensaio de Ultra-sons (7d)	t (µs)	40,48	v(m/s)	3950
Resistência à Flexão (7d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,0	R <sub>f</sub> (MPa)	7,1
Resistência à Compressão (7d)	F <sub>c</sub> (kN)	40,9	R <sub>c</sub> (MPa)	25,6
Ensaio de Ultra-sons (28d)	t (µs)	39,85	v(m/s)	4015
Resistência à Flexão (28d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,8	R <sub>f</sub> (MPa)	9,0
Resistência à Compressão (28d)	F <sub>c</sub> (kN)	54,6	R <sub>c</sub> (MPa)	34,2
Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )		0,22		
Ensaio de Ultra-sons (56d)	t (µs)	38,65	v(m/s)	4142
Resistência à Flexão (56d)	F <sub>f</sub> (kN)	3,7	R <sub>f</sub> (MPa)	8,7
Resistência à Compressão (56d)	F <sub>c</sub> (kN)	60,9	R <sub>c</sub> (MPa)	38,1
Ensaio de Ultra-sons (90d)	t (µs)	38,77	v(m/s)	4123
Resistência à Flexão (90d)	F <sub>f</sub> (kN)	4,5	R <sub>f</sub> (MPa)	10,5
Resistência à Compressão (90d)	F <sub>c</sub> (kN)	63,1	R <sub>c</sub> (MPa)	39,4

**Preparação da Pasta****Composição:**

CEM I 42,5 R - 350g; Resíduo de pedra natural (natureza calcária) - 75g; Resíduo de catalisador exausto petroquímico - 75g  
 SikaPlast 898: 2,5g (0,5%)

Dosagem: 1 dose

Data: 28/5

Hora: 12h40

Quantidade de água necessária à pasta de Consistência Normal (g)	130
Início de Presa	02:15:46:00
Fim de Presa	03:15:46:00

## **ANEXO D – TRATAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS**

D.1 – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÍLICA

D.2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

D.3 – ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS



## D.1 – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÍLICA

Agregado	SM 60/30		A30/40			S90/100	Total (g)
Malha (mm)	1,60	1,00	1,00	0,50	0,16	0,08	
	95,45	177,26	177,26	463,64	272,73	163,64	1349,98
agregado (%)	0,07	0,13	0,13	0,34	0,20	0,12	1,00
SiO <sub>2</sub> (%)	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	

composição siliciosa:  $0,98 \times 100 = 98,39 \%$

A determinação do teor de sílica, presente no agregado separado e misturado em laboratório, corresponde aos requisitos requeridos na norma NP EN 196-1 [69], tendo a areia grãos arredondados e teor de sílica superior a 98%.

## D.2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados apresentados são alvos de uma análise estatística, ou quanto muito, de um enquadramento estatístico, pois os resultados obtidos nos vários ensaios não são suficientes para caracterizar devidamente as propriedades observadas.

Muitos dos resultados são obtidos directamente pelos ensaios respectivos, que obedecem a procedimentos normalizados, que numa primeira frente permitem que estes por si só, já possuam algum enquadramento. No entanto não é excessivo representar esses mesmos resultados numa dimensão própria e estatisticamente comparativa.

A análise estatística utilizada no presente estudo está englobada no que se denomina de “estatística descritiva” ou “análise exploratória” ou, ainda, “análise preliminar de dados”, que visa sumariar e descrever os atributos mais proeminentes. Neste seguimento, foram calculadas numericamente as medidas amostrais, de entre as quais se destaca a dispersão e a tendência ou localização central.

### MEDIDAS DE LOCALIZAÇÃO

As medidas de localização, também denominadas de medidas de tendência central, são indicadores que representam de uma forma global, um conjunto de números. De entre estas medidas interessa a este estudo a média.

## ❖ MÉDIA

A média, ou valor médio, representa o centro de massa de vários valores, e é calculada pela seguinte expressão:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

sendo,

$\bar{x}$ - média aritmética;

$x_i$ - elementos da amostra;

$n$ - dimensão da amostra.

## MEDIDAS DE DISPERSÃO

As medidas de dispersão traduzem a variação de um conjunto de dados em torno da média, ou seja, da maior ou menor variabilidade dos resultados obtidos, devendo ser utilizadas conjuntamente com as medidas de localização, pois por si só não são suficientes para caracterizar um resultado.

Este tipo de medidas decorre da paridade de conceitos precisão/exactidão: por exemplo, uma determinada medida de localização poderá ser exacta, mas o espaço amostral ser demasiado alto, evidenciando dados muito pouco coerentes, logo pouco precisos. Com as medidas de dispersão é possível quantificar este tipo de acontecimentos. De entre estas medidas interessa a este estudo a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

## ❖ VARIÂNCIA

A variância é determinada com a média dos quadrados dos desvios dos resultados, tal como exposto na expressão:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

sendo,

$s^2$ - variância;

$\bar{x}$ - média aritmética;

$x_i$ - elementos da amostra;

$n$ - dimensão da amostra.

#### ❖ DESVIO PADRÃO

O desvio padrão amostral é útil para relacionar resultados da mesma natureza, uma vez que é apresentada na mesma unidade das observações, sendo determinada segundo:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

sendo,

$s$ - desvio padrão;

$\bar{x}$ - média aritmética;

$x_i$ - elementos da amostra;

$n$ - dimensão da amostra.

#### ❖ COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

A medida relativa de dispersão tem a vantagem de poder ser utilizada para comparar distribuições diferentes, sendo neste estudo, uma medida fundamental precisamente porque os tipos de resultados obtidos pertencem a distribuições distintas. O coeficiente de variação é definido pela relação entre o desvio padrão e a média.

$$cv = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$$

sendo,

$cv$ - coeficiente de variação;

$s$ - desvio padrão;

$\bar{x}$ - média aritmética.

### **D.3 – ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS**

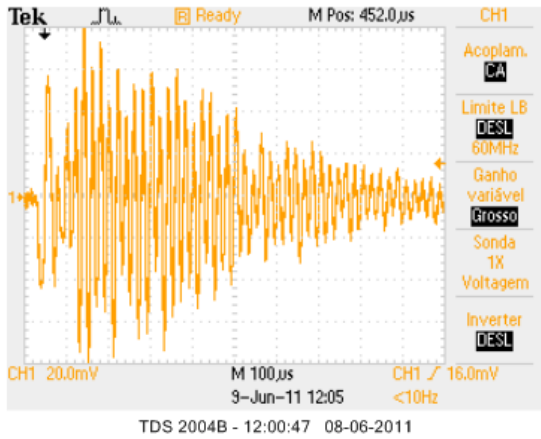
#### VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS

Devido à extensão da presente TFM apresenta-se, a título de exemplo, as ondas longitudinais registadas pelo osciloscópio, bem como, os valores médios de velocidade e tempo de propagação de

ondas ultra-sônicas, obtidas no aparelho de Ultra-sons, obtidos para a mistura 100C, nos provetes avaliados aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias de idade.

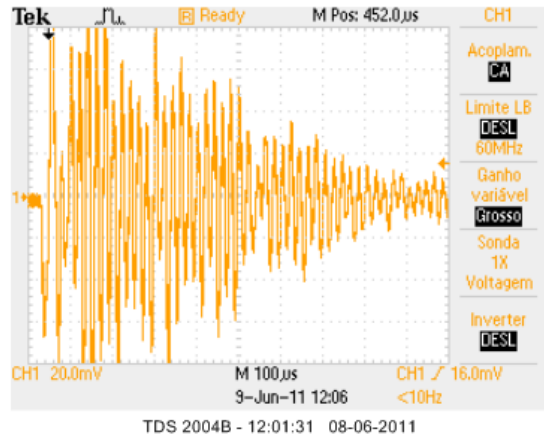
❖ ONDA LONGITUDINAL (OSCILOSCÓPIO) - MISTURA 100C

2 Dias



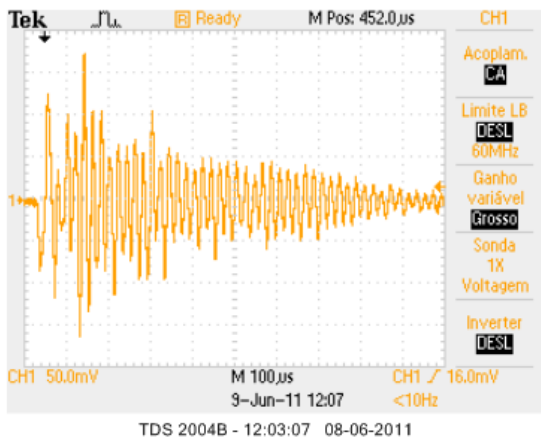
TDS 2004B - 12:00:47 08-06-2011

$t = 38,8 \mu\text{s}; v = 4120 \text{ m/s}$



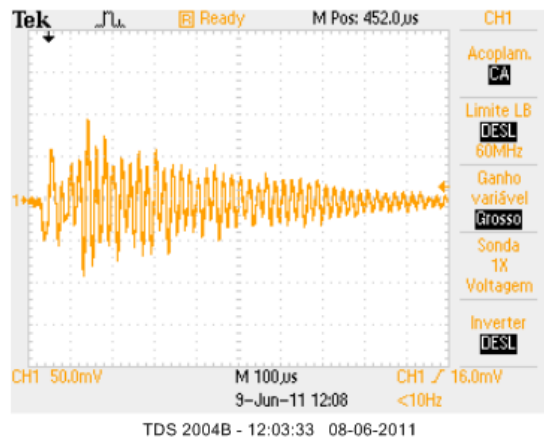
TDS 2004B - 12:01:31 08-06-2011

$t = 38,7 \mu\text{s}; v = 4130 \text{ m/s}$



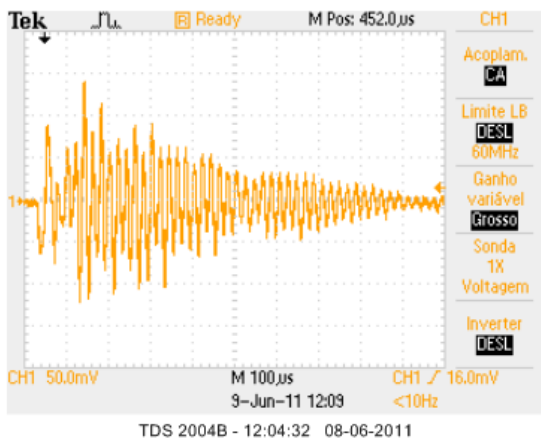
TDS 2004B - 12:03:07 08-06-2011

$t = 38,8 \mu\text{s}; v = 4120 \text{ m/s}$



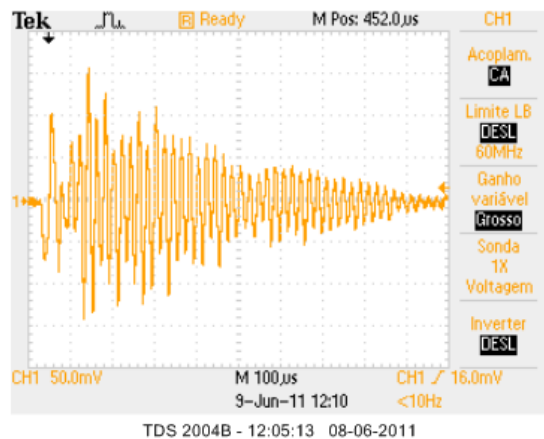
TDS 2004B - 12:03:33 08-06-2011

$t = 39,0 \mu\text{s}; v = 4100 \text{ m/s}$



TDS 2004B - 12:04:32 08-06-2011

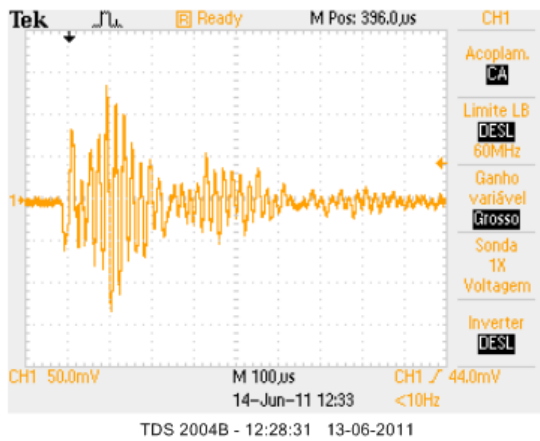
$t = 39,0 \mu\text{s}; v = 4100 \text{ m/s}$



TDS 2004B - 12:05:13 08-06-2011

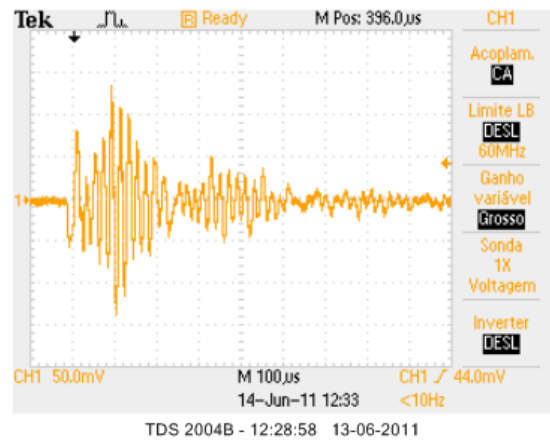
$t = 38,9 \mu\text{s}; v = 4110 \text{ m/s}$

7 Dias



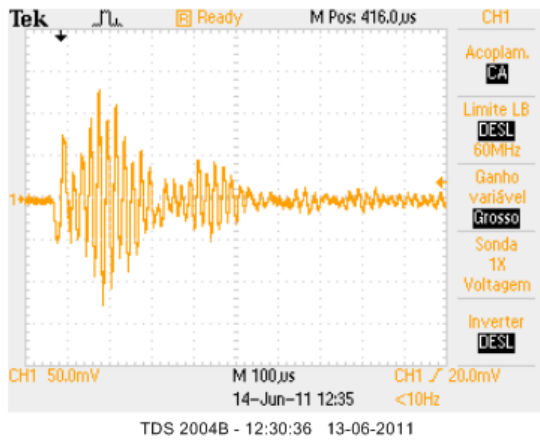
TDS 2004B - 12:28:31 13-06-2011

$t = 36,9 \mu\text{s}$ ;  $v = 4340 \text{ m/s}$



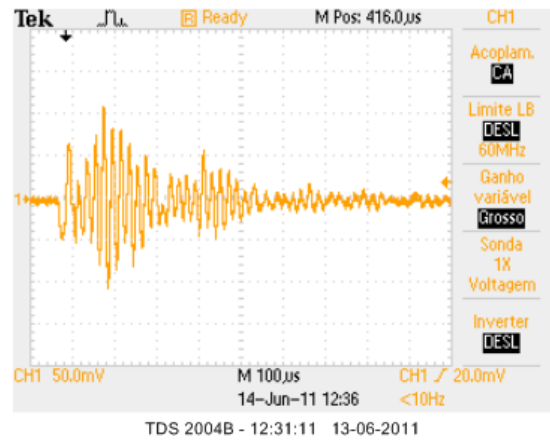
TDS 2004B - 12:28:58 13-06-2011

$t = 36,9 \mu\text{s}$ ;  $v = 4340 \text{ m/s}$



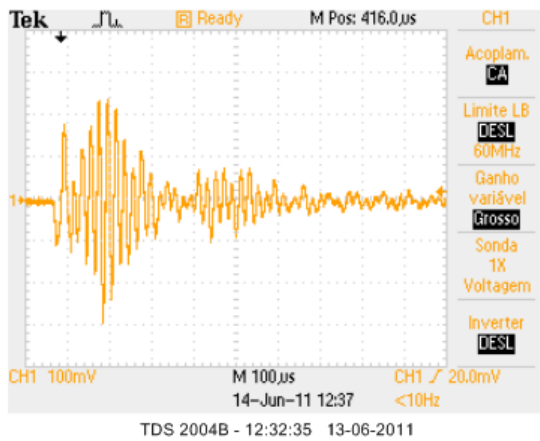
TDS 2004B - 12:30:36 13-06-2011

$t = 36,6 \mu\text{s}$ ;  $v = 4370 \text{ m/s}$



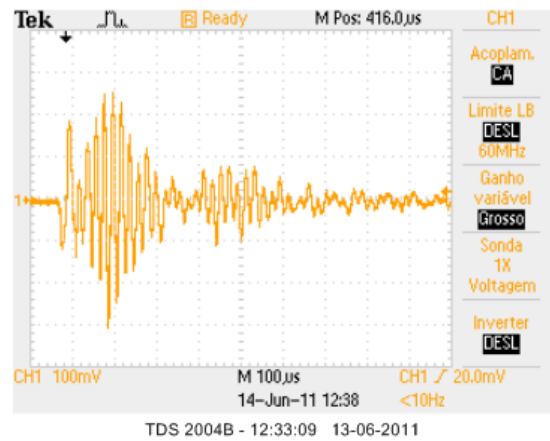
TDS 2004B - 12:31:11 13-06-2011

$t = 36,7 \mu\text{s}$ ;  $v = 4360 \text{ m/s}$



TDS 2004B - 12:32:35 13-06-2011

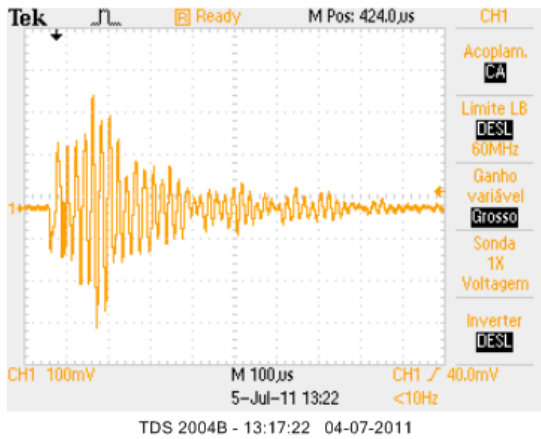
$t = 36,4 \mu\text{s}$ ;  $v = 4400 \text{ m/s}$



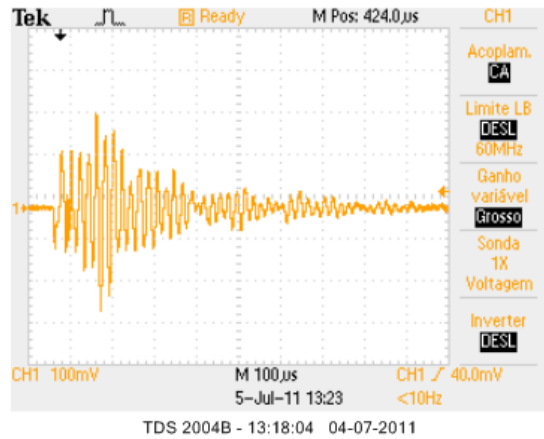
TDS 2004B - 12:33:09 13-06-2011

$t = 36,4 \mu\text{s}$ ;  $v = 4400 \text{ m/s}$

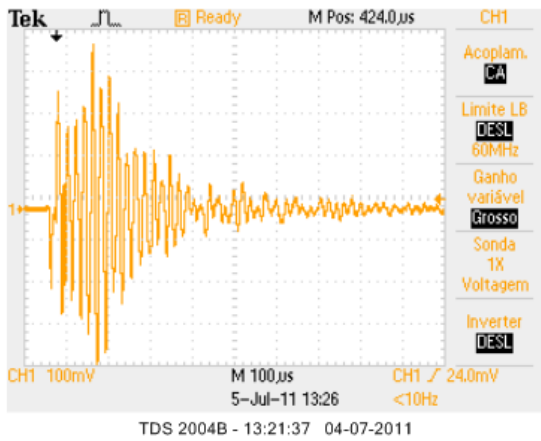
28 Dias



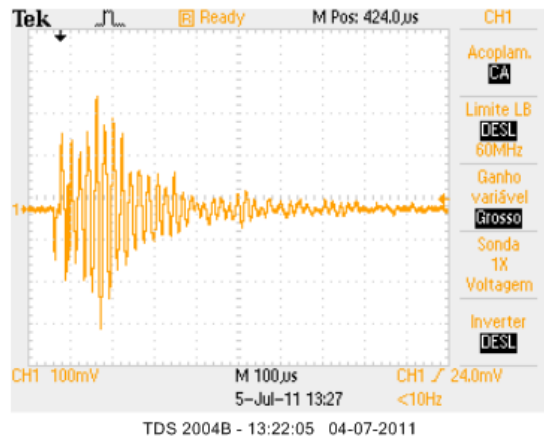
$t = 35,9 \mu\text{s}$ ;  $v = 4460 \text{ m/s}$



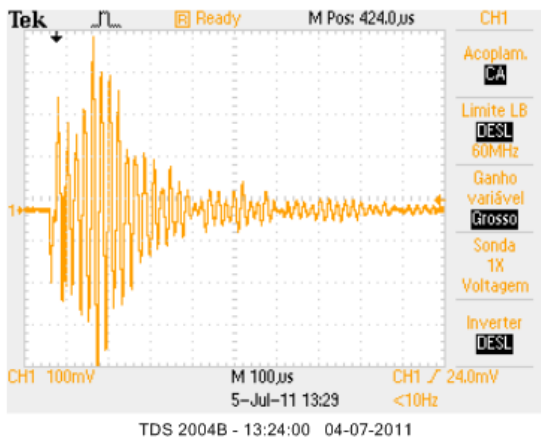
$t = 35,9 \mu\text{s}$ ;  $v = 4460 \text{ m/s}$



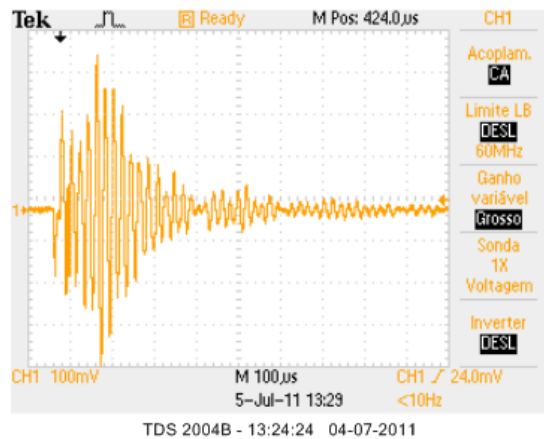
$t = 35,9 \mu\text{s}$ ;  $v = 4460 \text{ m/s}$



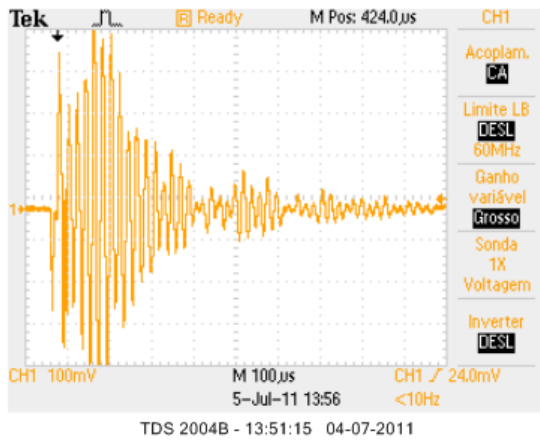
$t = 35,9 \mu\text{s}$ ;  $v = 4460 \text{ m/s}$



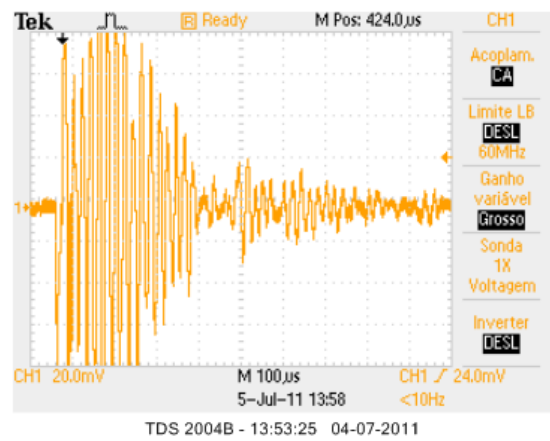
$t = 36,0 \mu\text{s}$ ;  $v = 4440 \text{ m/s}$



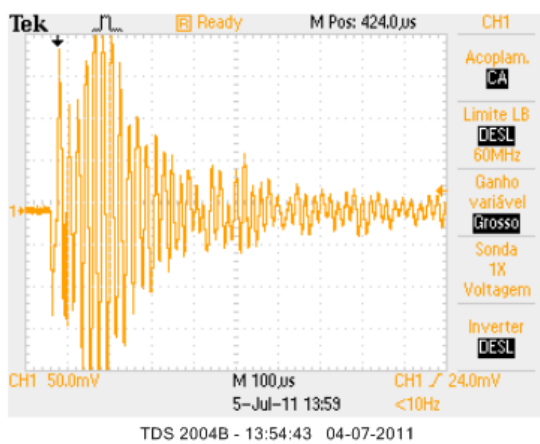
$t = 36,0 \mu\text{s}$ ;  $v = 4440 \text{ m/s}$



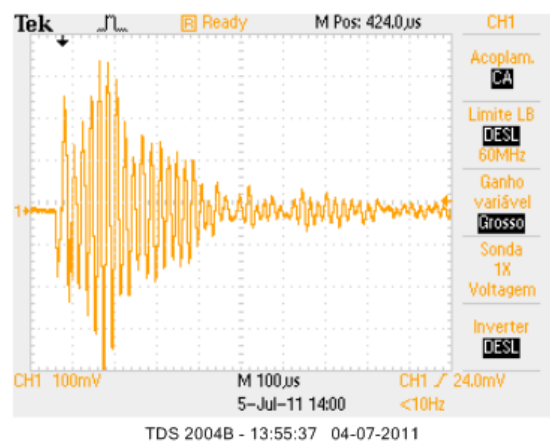
$t = 35,9 \mu\text{s}; v = 4460 \text{ m/s}$



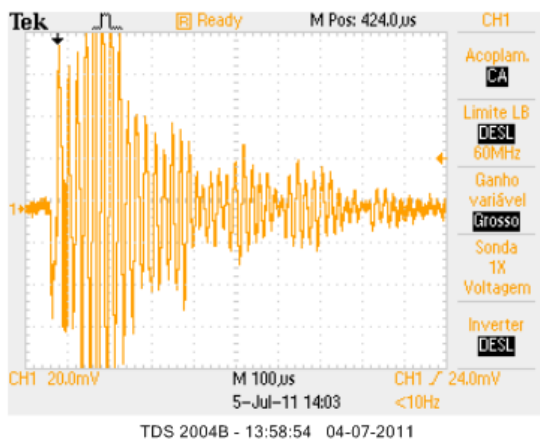
$t = 36,1 \mu\text{s}; v = 4430 \text{ m/s}$



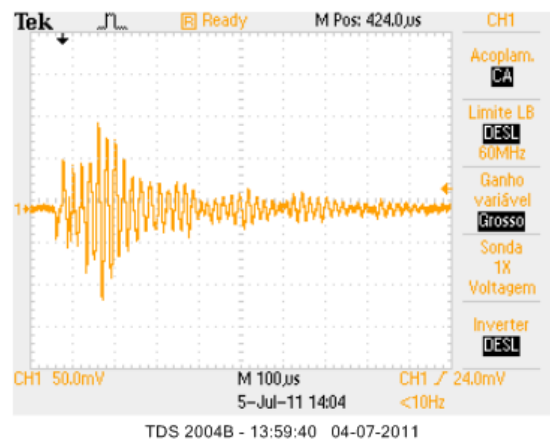
$t = 36,2 \mu\text{s}; v = 4420 \text{ m/s}$



$t = 36,1 \mu\text{s}; v = 4430 \text{ m/s}$

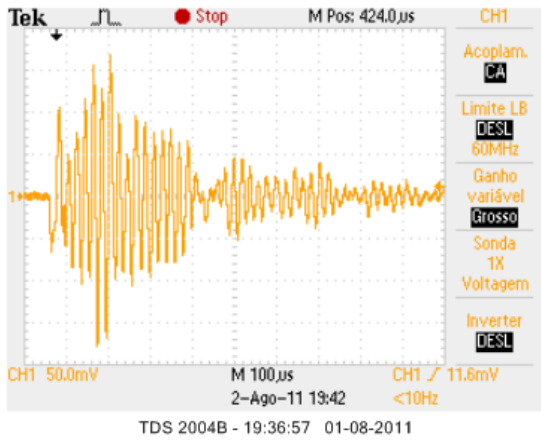


$t = 36,0 \mu\text{s}; v = 4440 \text{ m/s}$

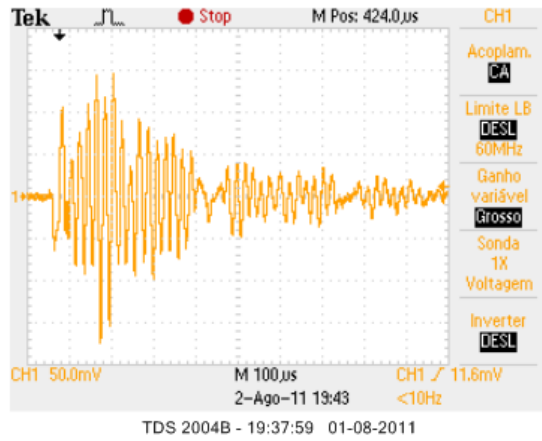


$t = 36,1 \mu\text{s}; v = 4430 \text{ m/s}$

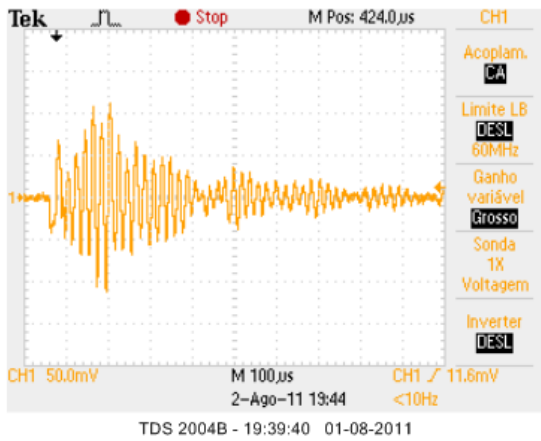
56 dias



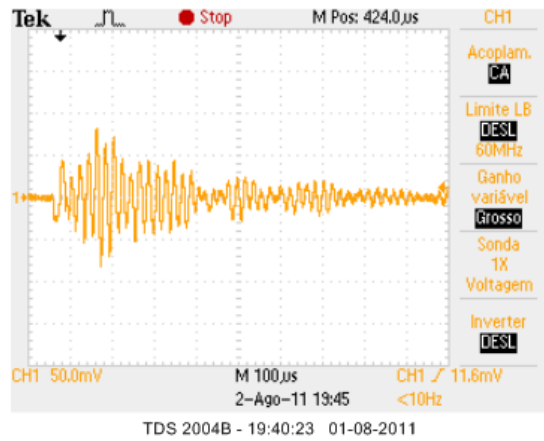
$t = 35,8 \mu\text{s}$ ;  $v = 4470 \text{ m/s}$



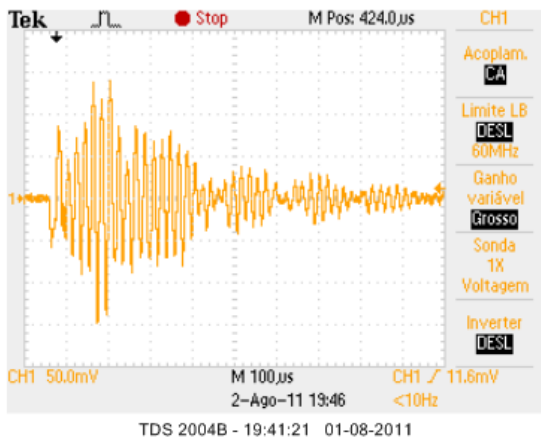
$t = 35,7 \mu\text{s}$ ;  $v = 4480 \text{ m/s}$



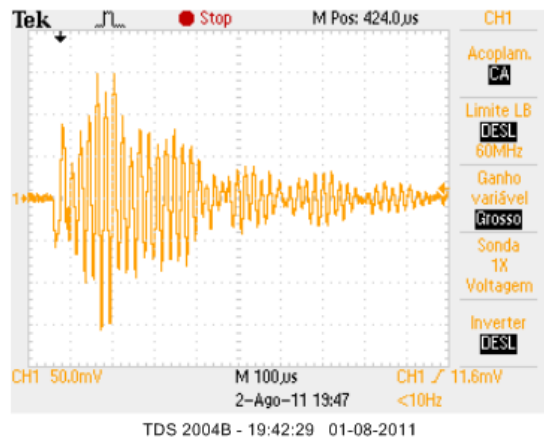
$t = 35,8 \mu\text{s}$ ;  $v = 4470 \text{ m/s}$



$t = 36,0 \mu\text{s}$ ;  $v = 4440 \text{ m/s}$

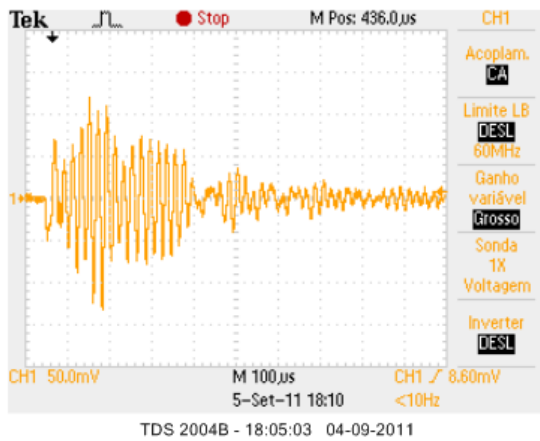


$t = 35,8 \mu\text{s}$ ;  $v = 4470 \text{ m/s}$

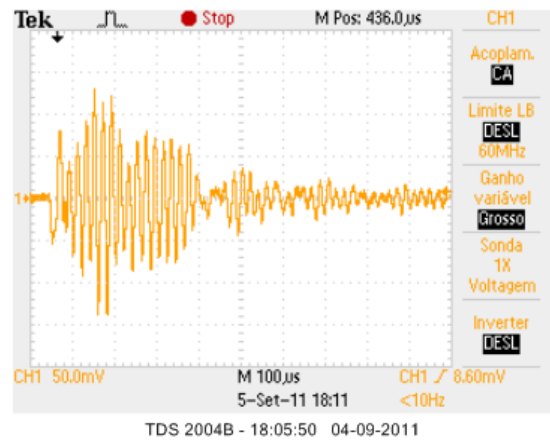


$t = 35,9 \mu\text{s}$ ;  $v = 4460 \text{ m/s}$

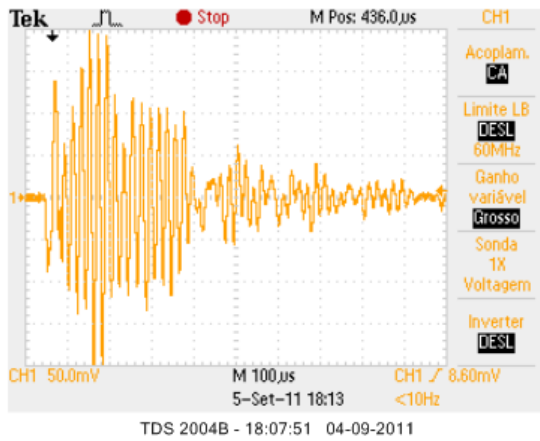
90 Dias



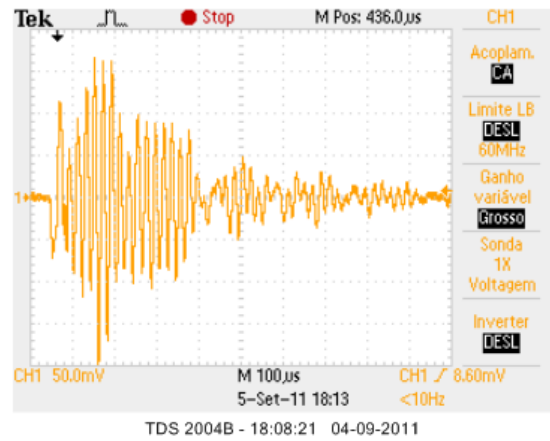
$t = 35,9 \mu\text{s}$ ;  $v = 4460 \text{ m/s}$



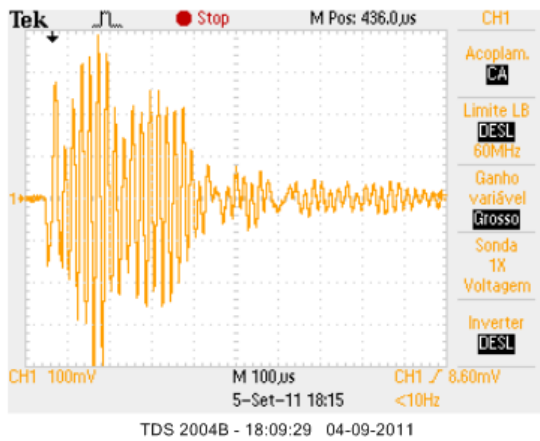
$t = 35,8 \mu\text{s}$ ;  $v = 4470 \text{ m/s}$



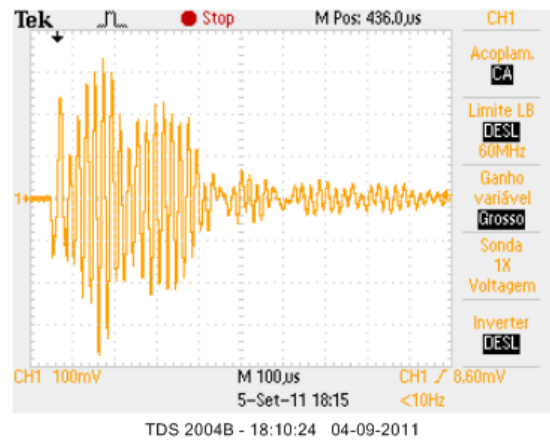
$t = 35,6 \mu\text{s}$ ;  $v = 4490 \text{ m/s}$



$t = 35,7 \mu\text{s}$ ;  $v = 4480 \text{ m/s}$



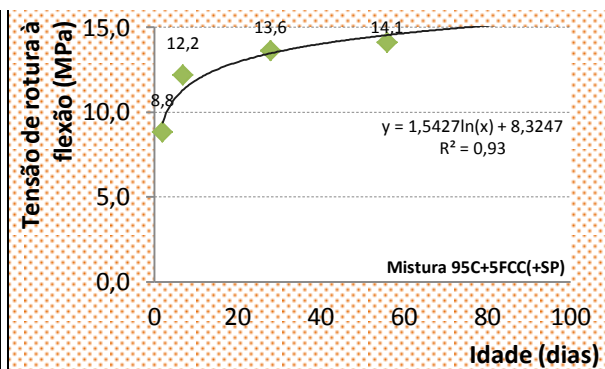
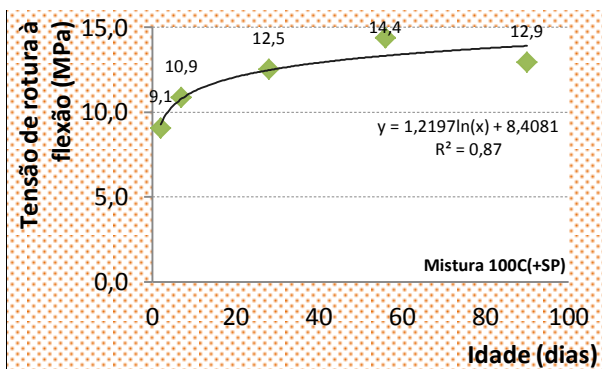
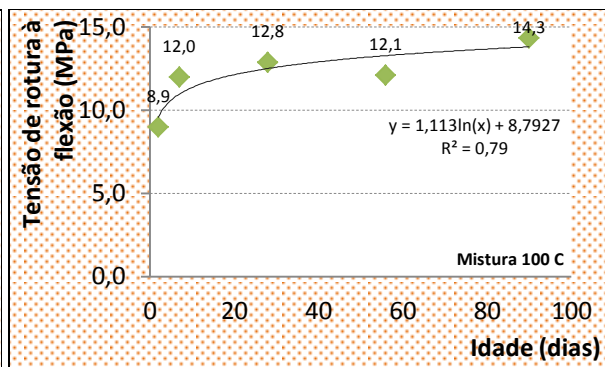
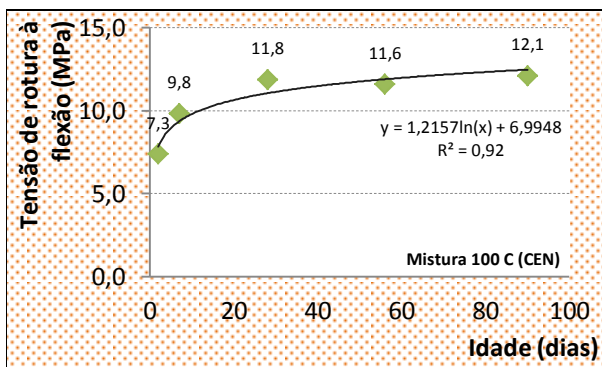
$t = 35,4 \mu\text{s}$ ;  $v = 4520 \text{ m/s}$

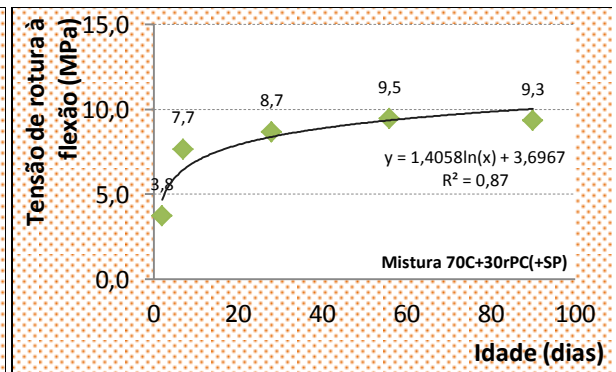
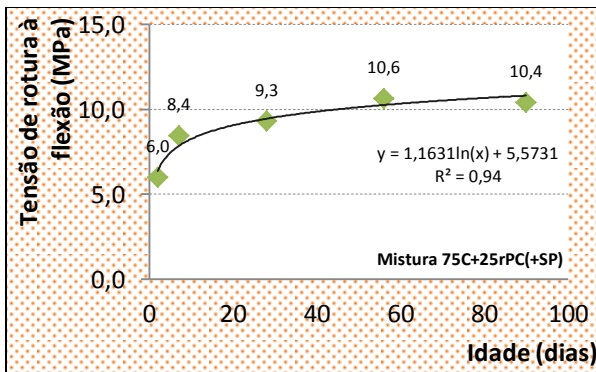
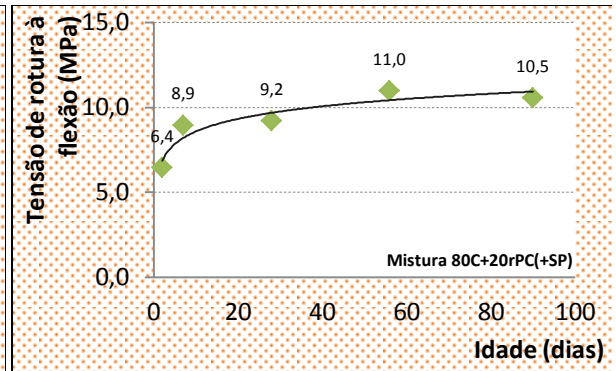
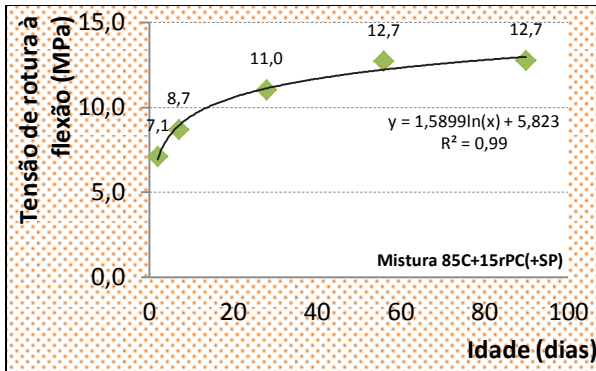
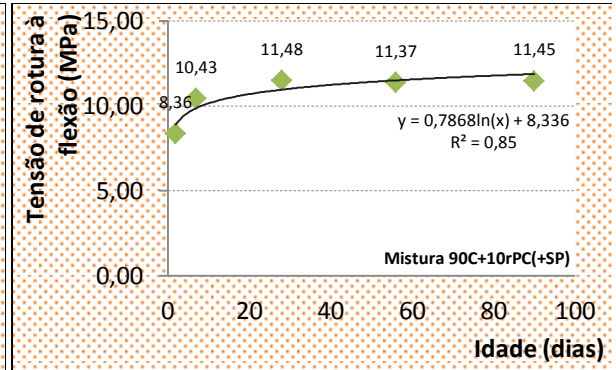
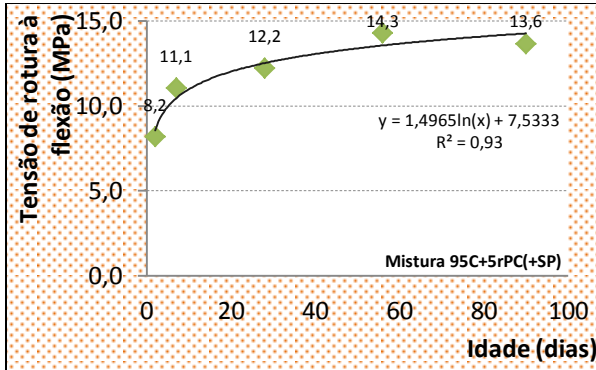
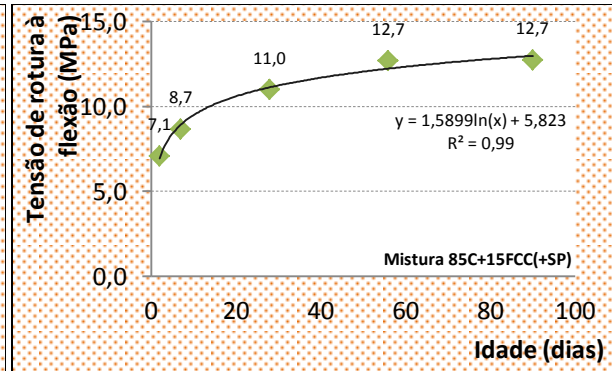
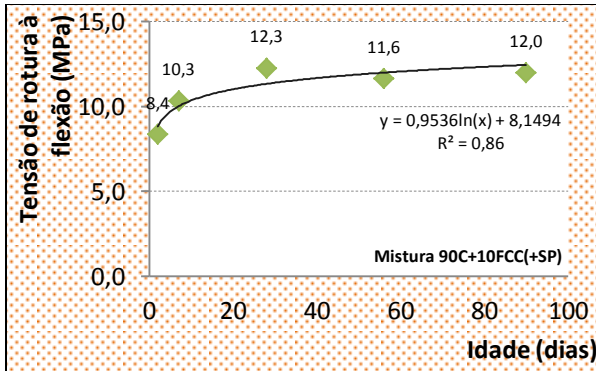


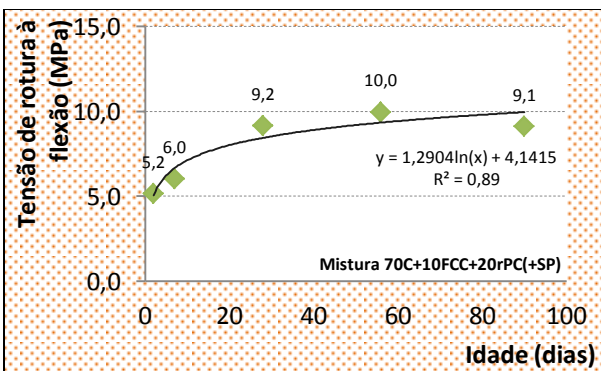
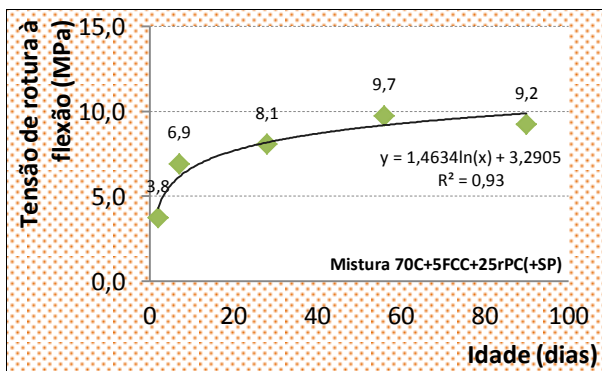
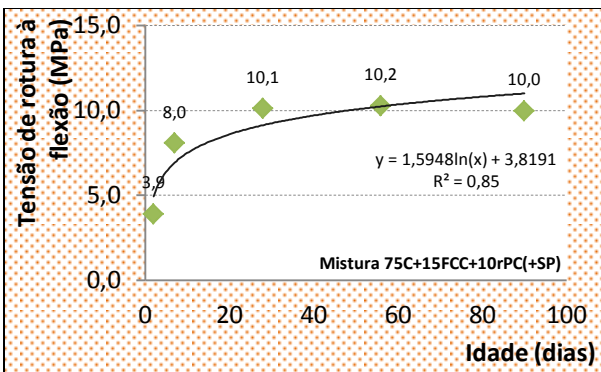
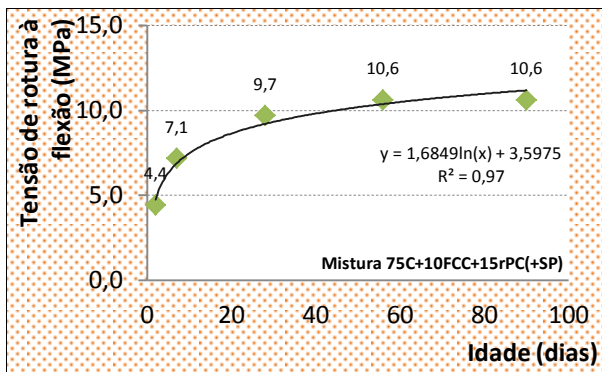
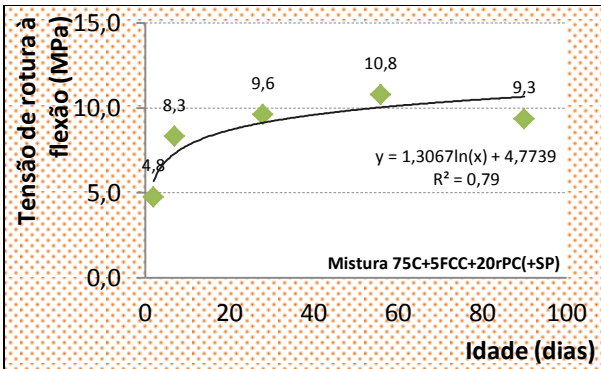
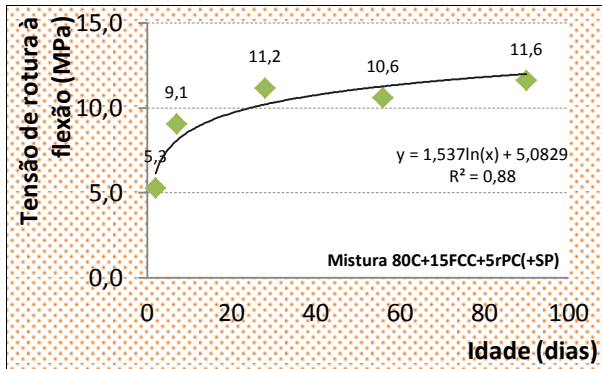
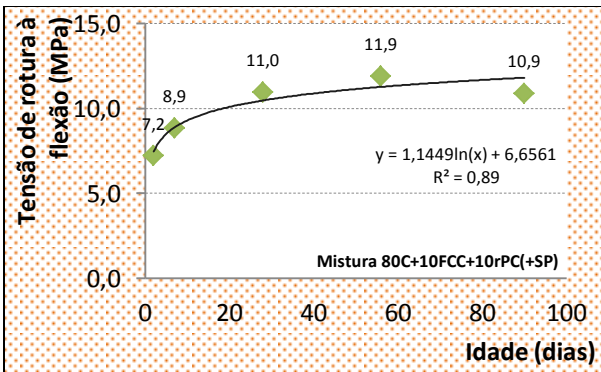
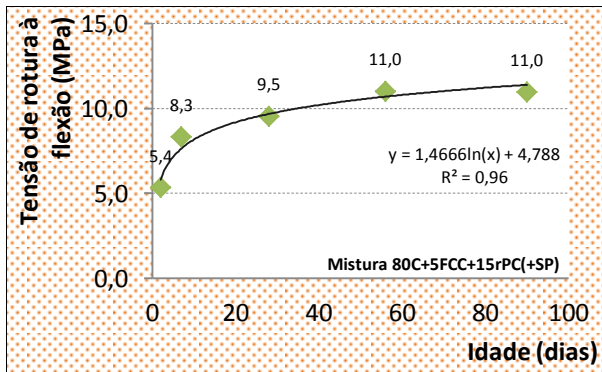
$t = 35,4 \mu\text{s}$ ;  $v = 4520 \text{ m/s}$

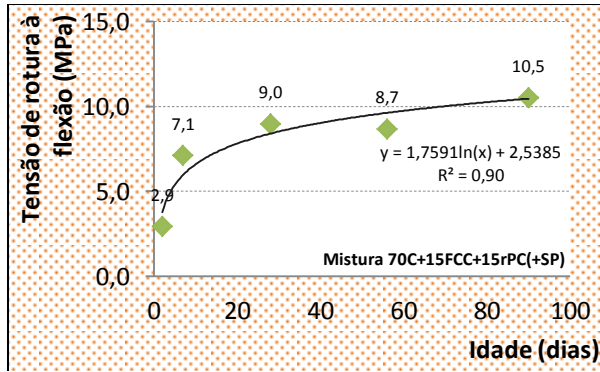
## RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Mistura	Tensão de rotura à flexão (MPa)				
	2d	7d	28d	56d	90d
100C(CEN)	7,3	9,8	11,8	11,6	12,1
100C	8,9	12,0	12,8	12,1	14,3
100C(+SP)	9,1	10,9	12,5	14,4	12,9
95C+5FCC(+SP)	8,8	12,2	13,6	14,1	0,0
90C+10FCC(+SP)	8,4	10,3	12,3	11,6	12,0
85C+15FCC(+SP)	7,1	8,7	11,0	12,7	12,7
95C+5rPC(+SP)	8,2	11,1	12,2	14,3	13,6
90C+10rPC(+SP)	8,4	10,4	11,5	11,4	11,4
85C+15rPC(+SP)	7,7	10,0	11,6	12,1	12,3
80C+20rPC(+SP)	6,4	8,9	9,2	11,0	10,5
75C+25rPC(+SP)	6,0	8,4	9,3	10,6	10,4
70C+30rPC(+SP)	3,8	7,7	8,7	9,5	9,3
80C+5FCC+15rPC(+SP)	5,4	8,3	9,5	11,0	11,0
80C+10FCC+10rPC(+SP)	7,2	8,9	11,0	11,9	10,9
80C+15FCC+5rPC(+SP)	5,3	9,1	11,2	10,6	11,6
75C+5FCC+20rPC(+SP)	4,8	8,3	9,6	10,8	9,3
75C+10FCC+15rPC(+SP)	4,4	7,1	9,7	10,6	10,6
75C+15FCC+10rPC(+SP)	3,9	8,0	10,1	10,2	10,0
70C+5FCC+25rPC(+SP)	3,8	6,9	8,1	9,7	9,2
70C+10FCC+20rPC(+SP)	5,2	6,0	9,2	10,0	9,1
70C+15FCC+15rPC(+SP)	2,9	7,1	9,0	8,7	10,5



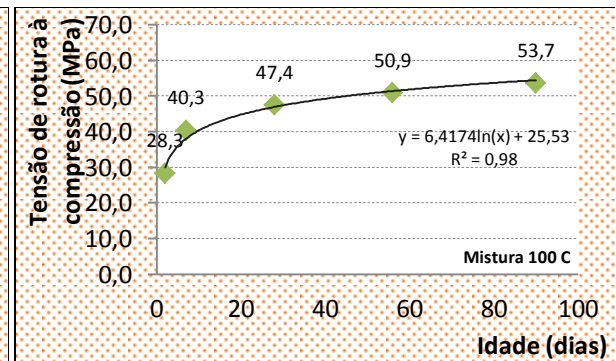
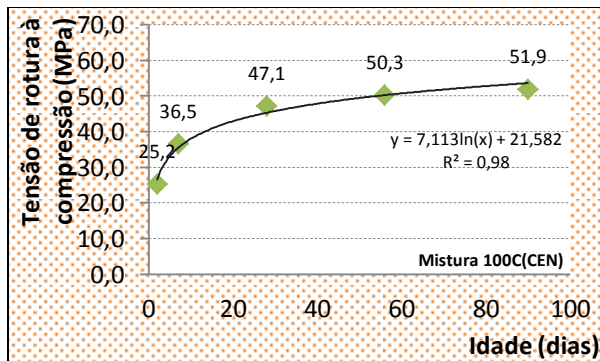


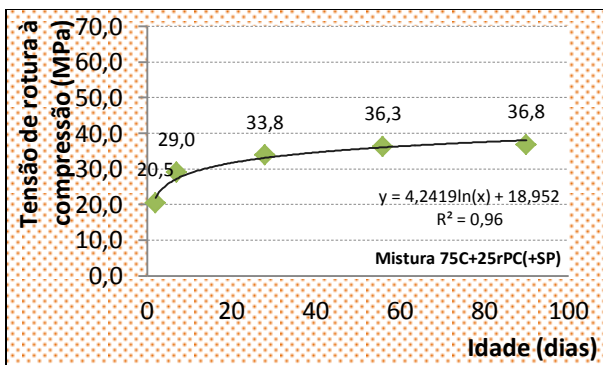
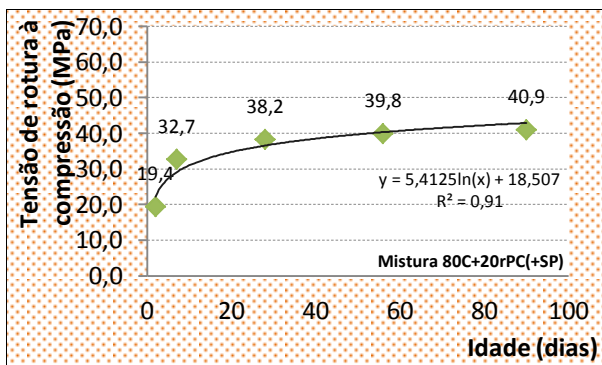
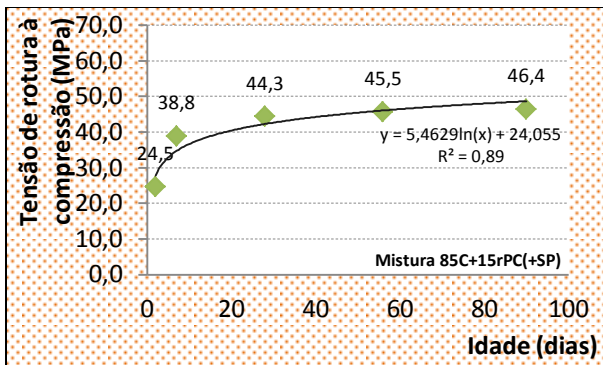
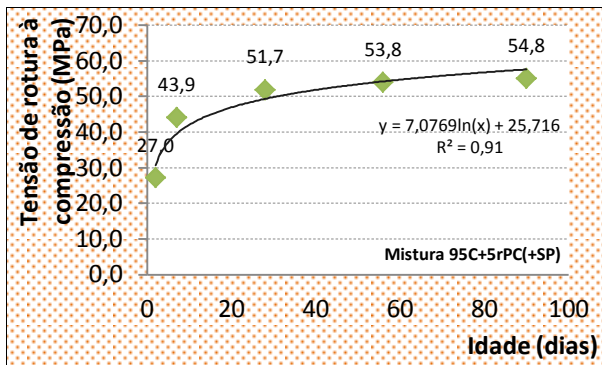
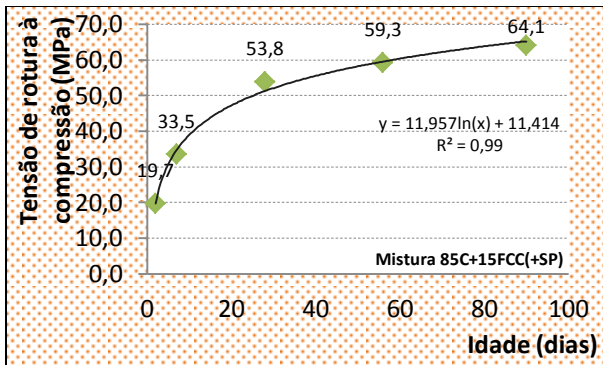
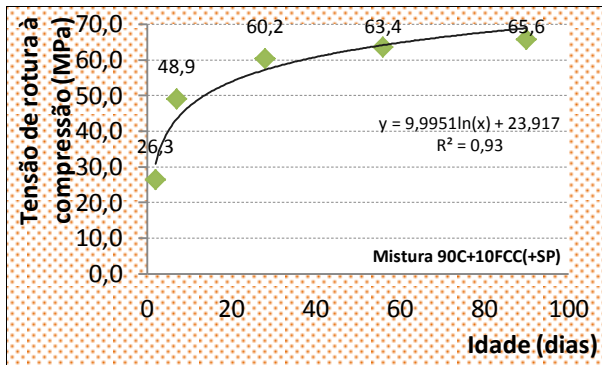
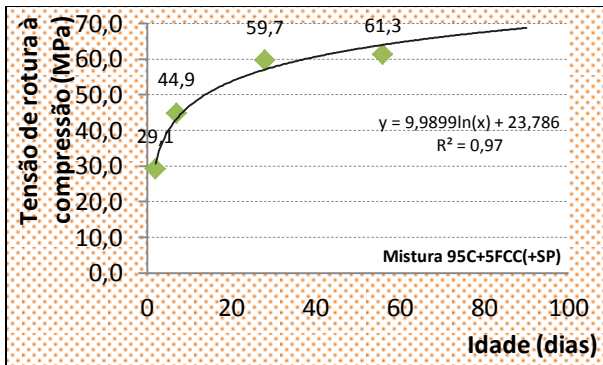
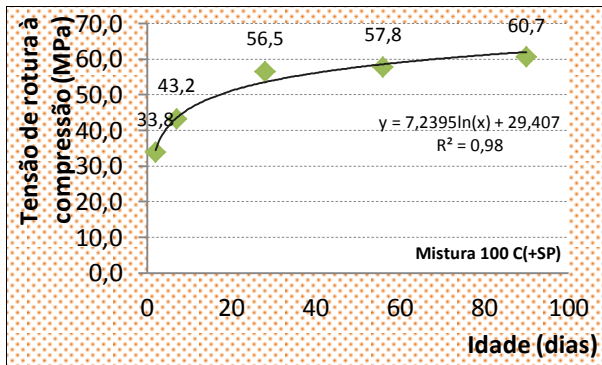


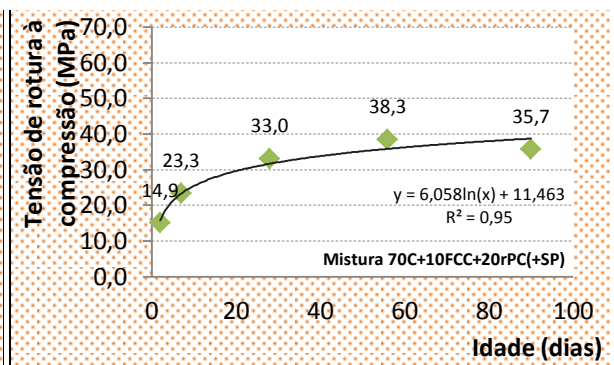
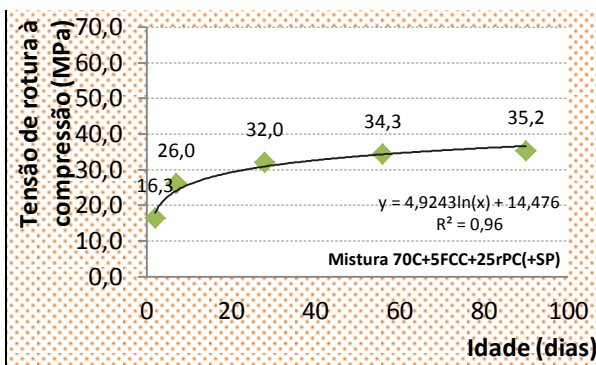
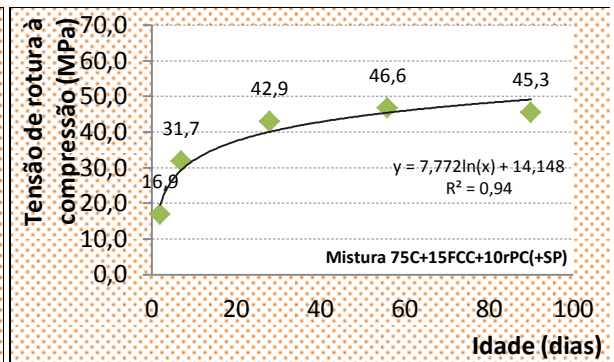
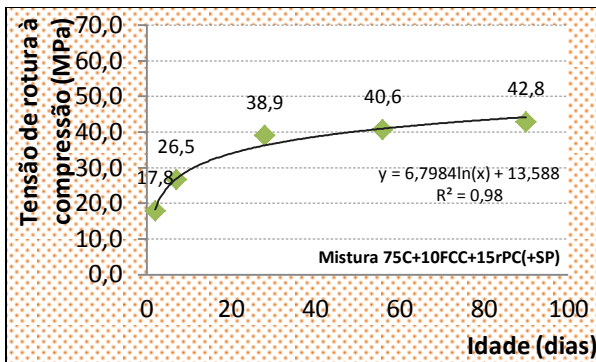
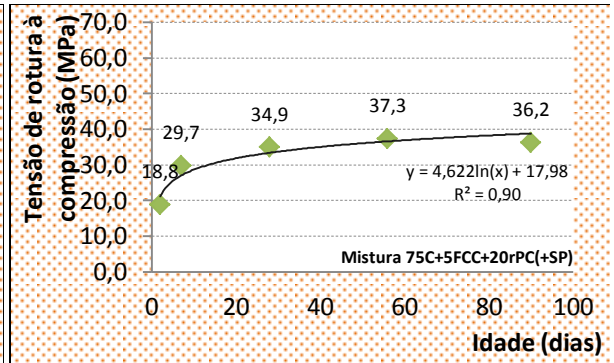
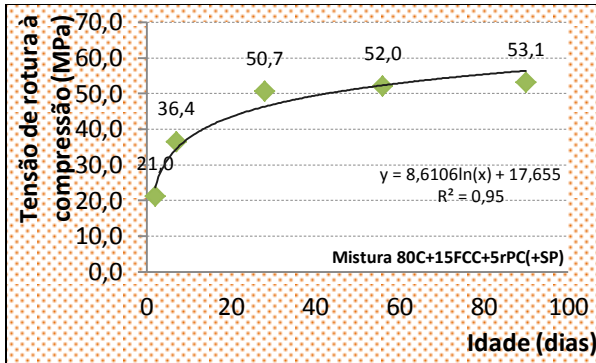
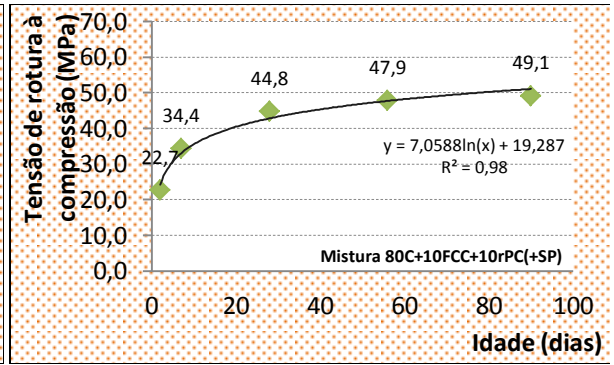
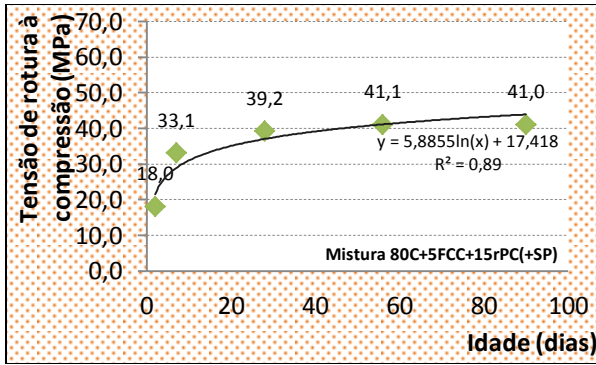


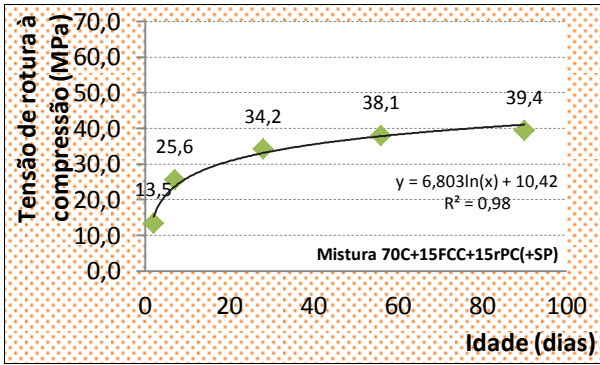
## RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Mistura	Tensão de rotura à compressão (MPa)				
	2d	7d	28d	56d	90d
100C(CEN)	25,2	36,5	47,1	50,3	51,9
100C	28,3	40,3	47,4	50,9	53,7
100C(+SP)	33,8	43,2	56,5	57,8	60,7
95C+5FCC(+SP)	29,1	44,9	59,7	61,3	0,0
90C+10FCC(+SP)	26,3	48,9	60,2	63,4	65,6
85C+15FCC(+SP)	19,7	33,5	53,8	59,3	64,1
95C+5rPC(+SP)	27,0	43,9	51,7	53,8	54,8
90C+10rPC(+SP)	27,3	38,4	45,9	48,8	48,5
85C+15rPC(+SP)	24,5	38,8	44,3	45,5	46,4
80C+20rPC(+SP)	19,4	32,7	38,2	39,8	40,9
75C+25rPC(+SP)	20,5	29,0	33,8	36,3	36,8
70C+30rPC(+SP)	16,2	26,1	31,7	33,0	32,3
80C+5FCC+15rPC(+SP)	18,0	33,1	39,2	41,1	41,0
80C+10FCC+10rPC(+SP)	22,7	34,4	44,8	47,9	49,1
80C+15FCC+5rPC(+SP)	21,0	36,4	50,7	52,0	53,1
75C+5FCC+20rPC(+SP)	18,8	29,7	34,9	37,3	36,2
75C+10FCC+15rPC(+SP)	17,8	26,5	38,9	40,6	42,8
75C+15FCC+10rPC(+SP)	16,9	31,7	42,9	46,6	45,3
70C+5FCC+25rPC(+SP)	16,3	26,0	32,0	34,3	35,2
70C+10FCC+20rPC(+SP)	14,9	23,3	33,0	38,3	35,7

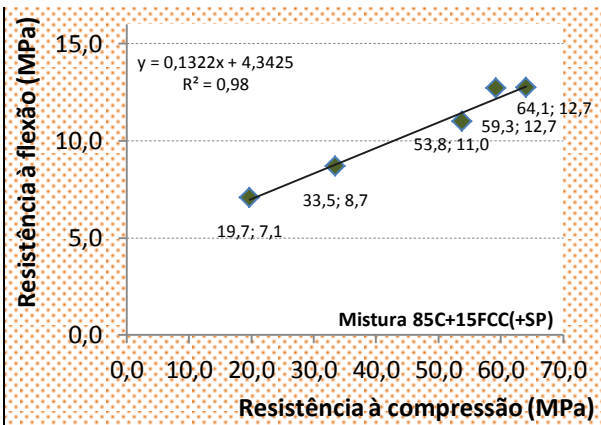
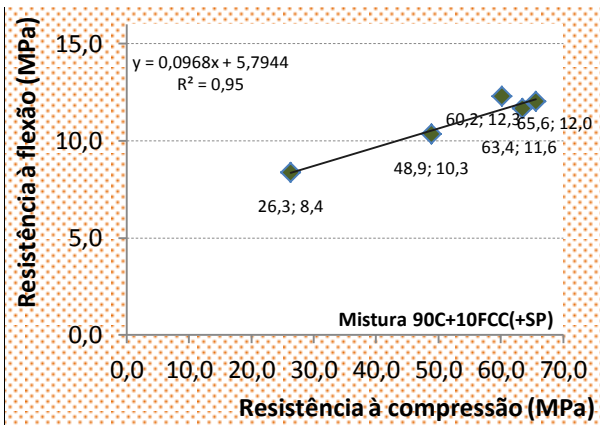
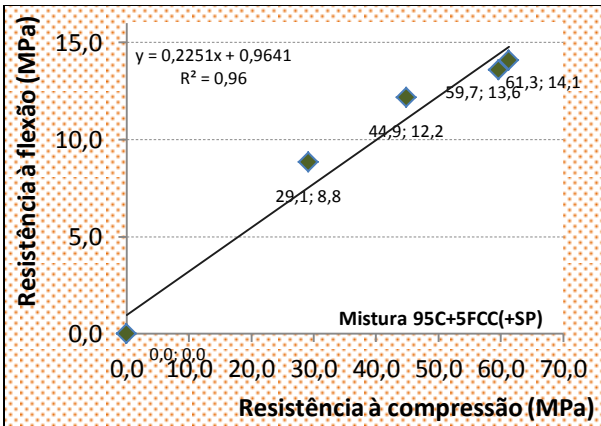
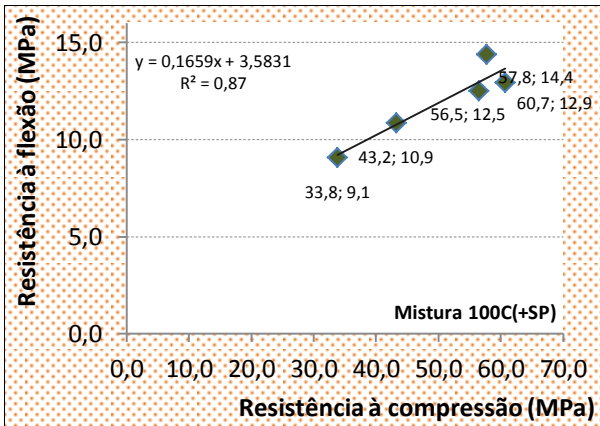
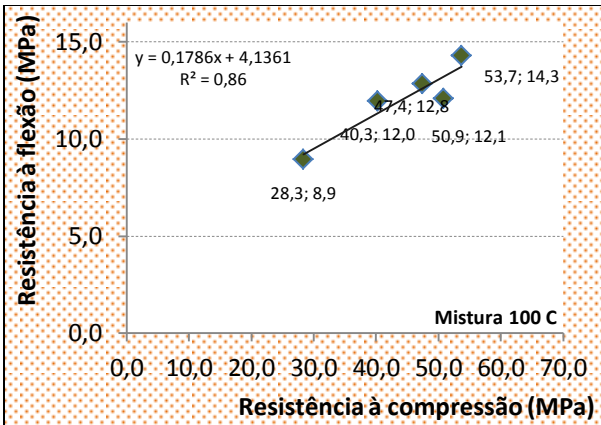
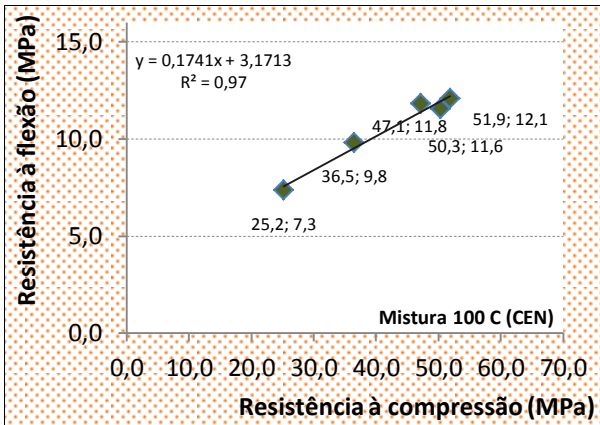


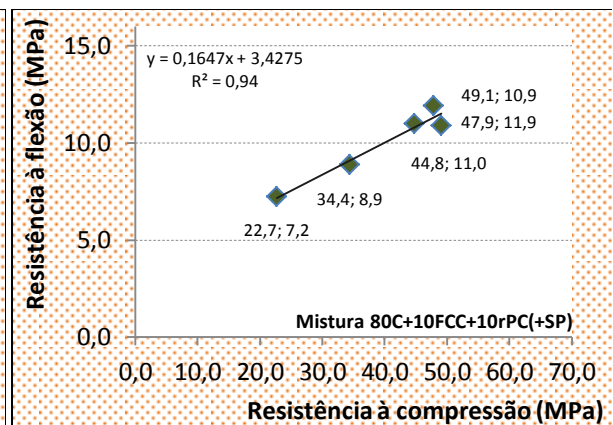
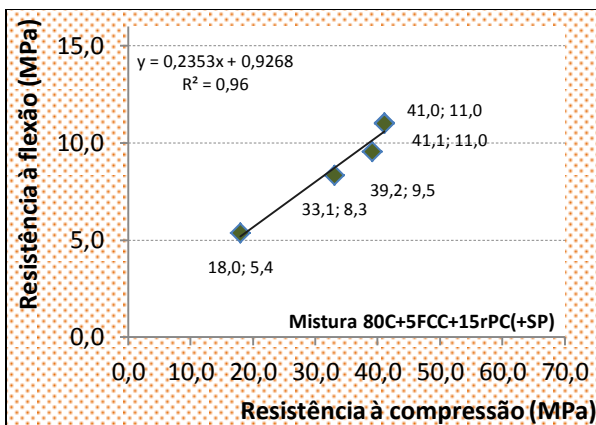
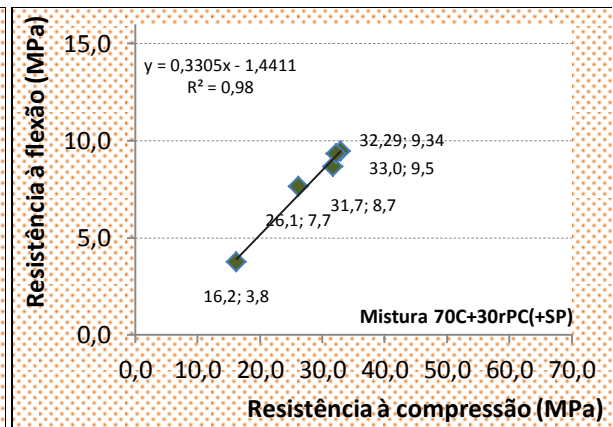
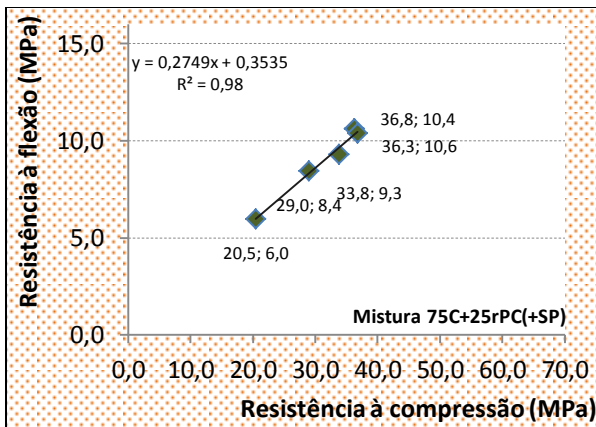
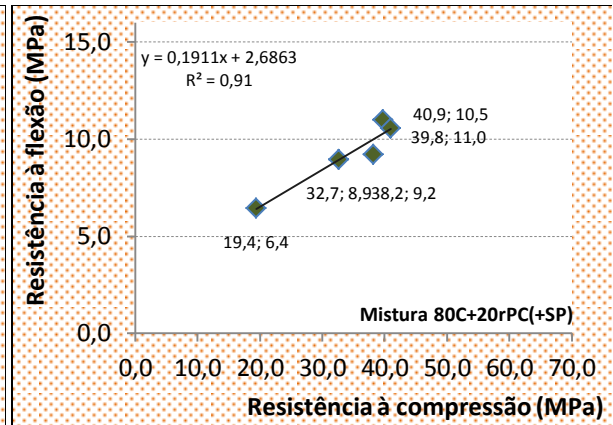
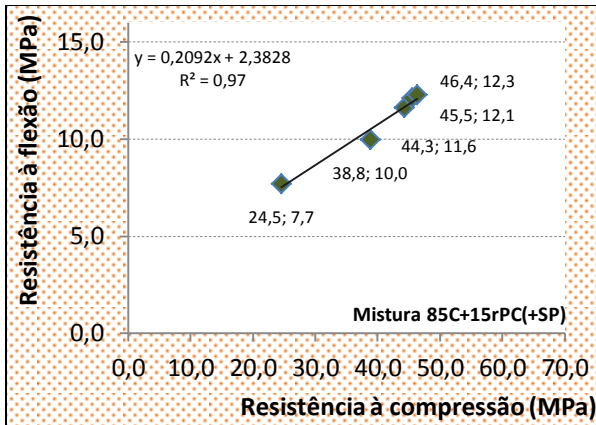
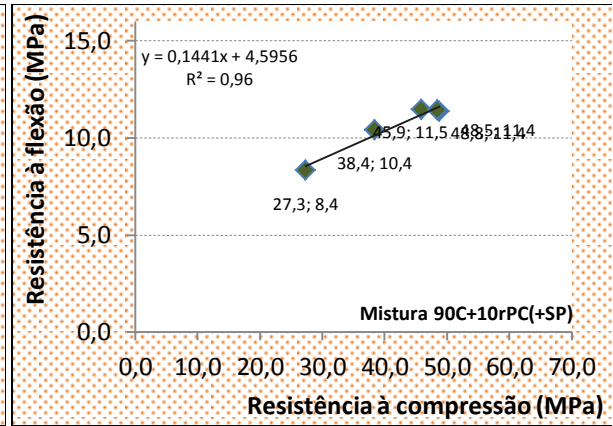
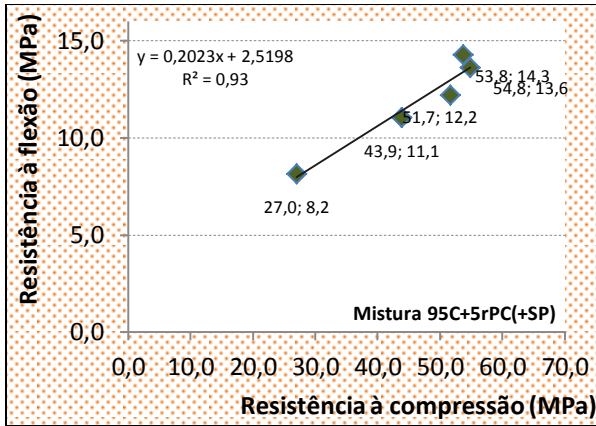


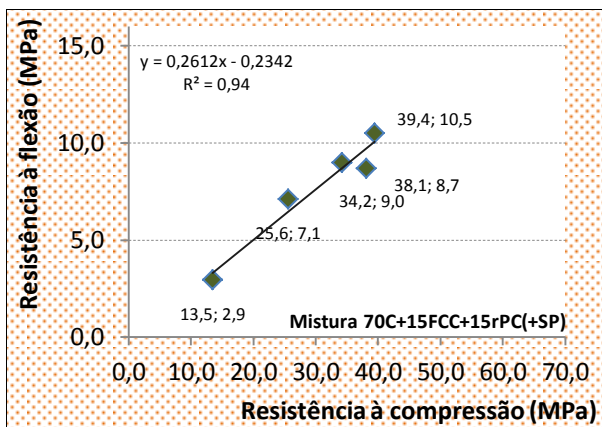
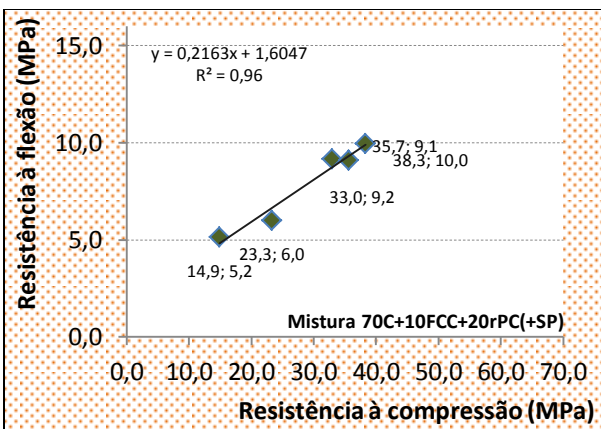
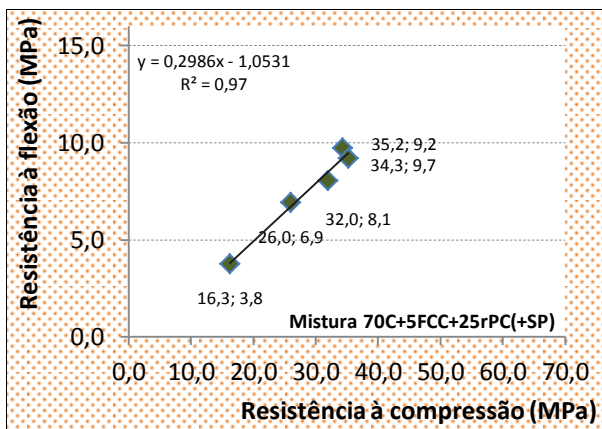
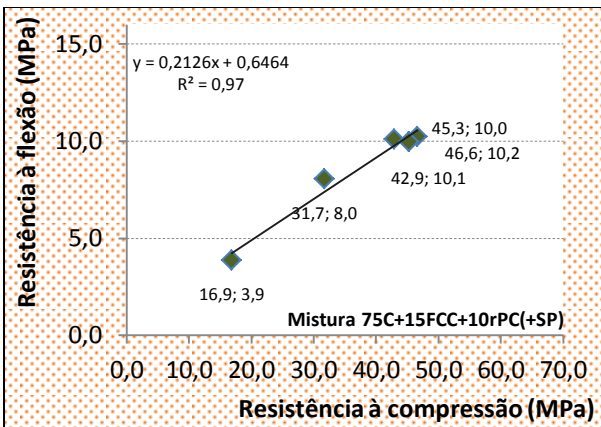
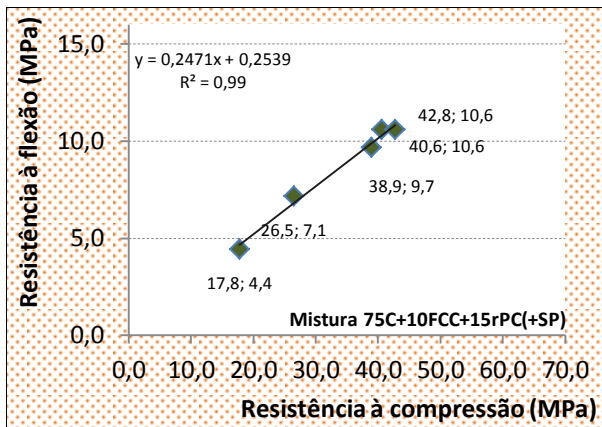
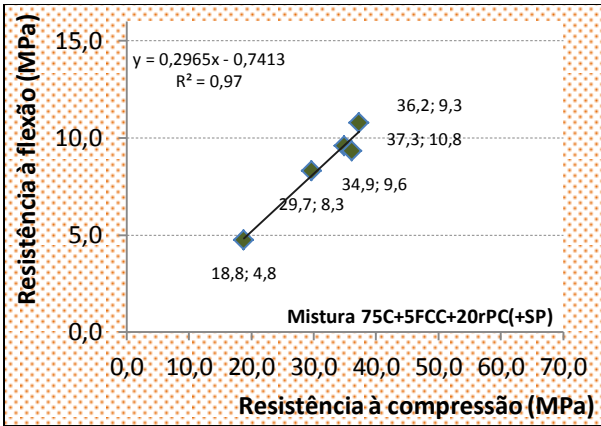
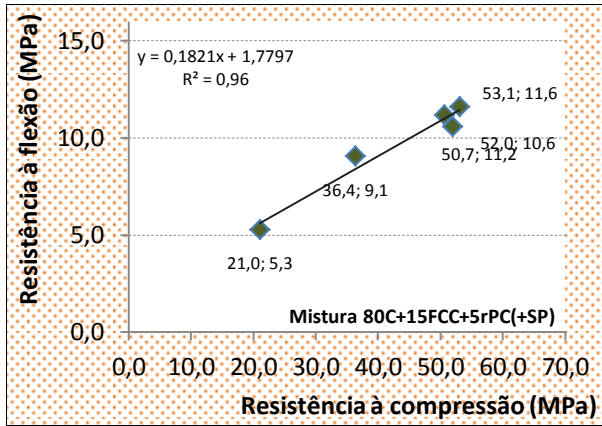




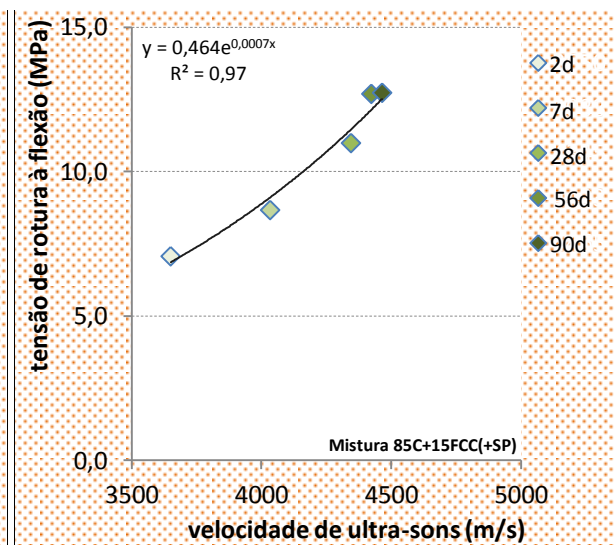
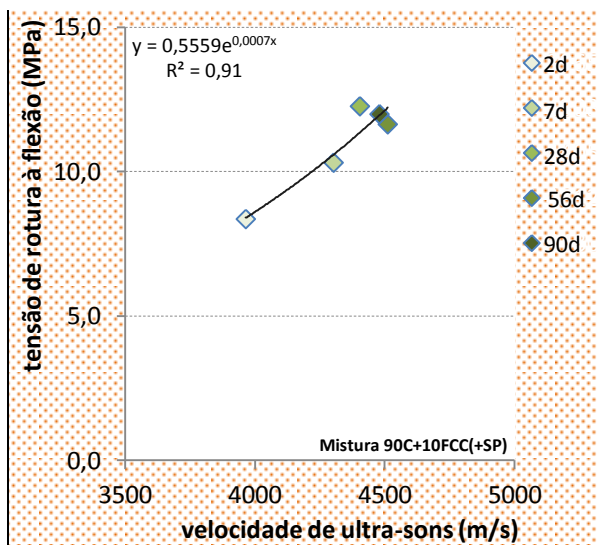
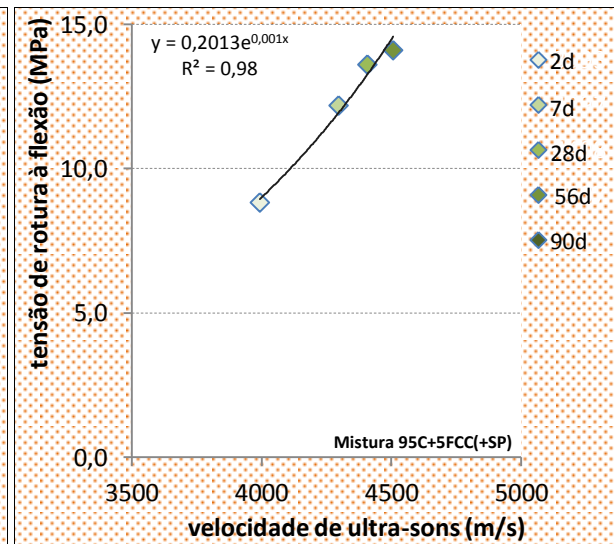
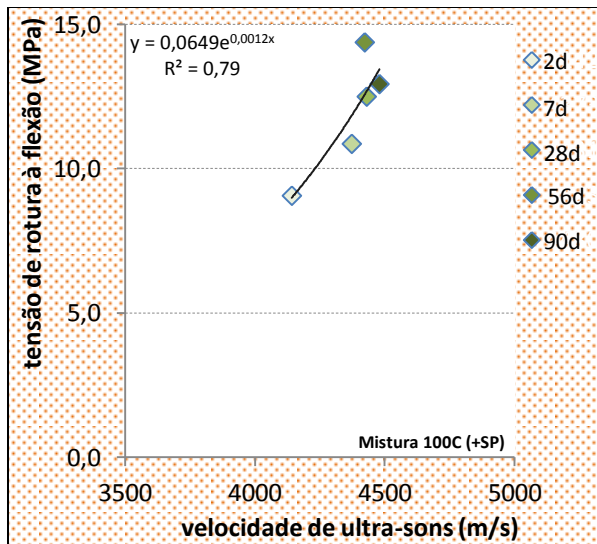
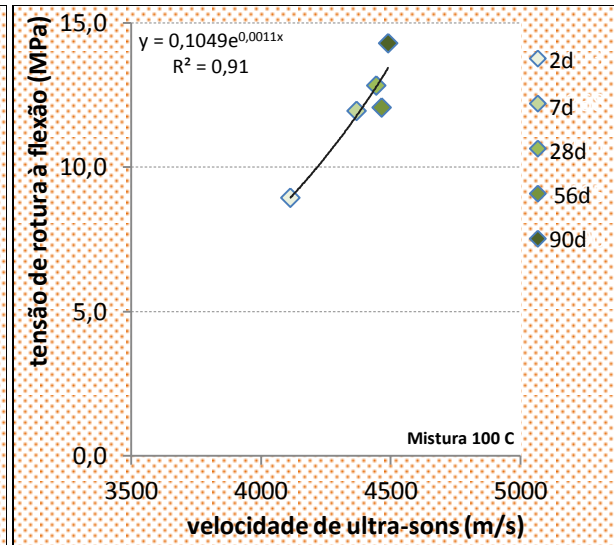
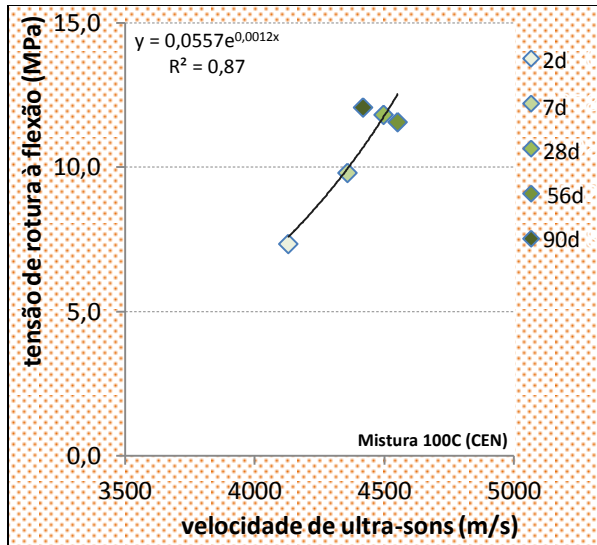
**RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS (FLEXÃO E COMPRESSÃO)**

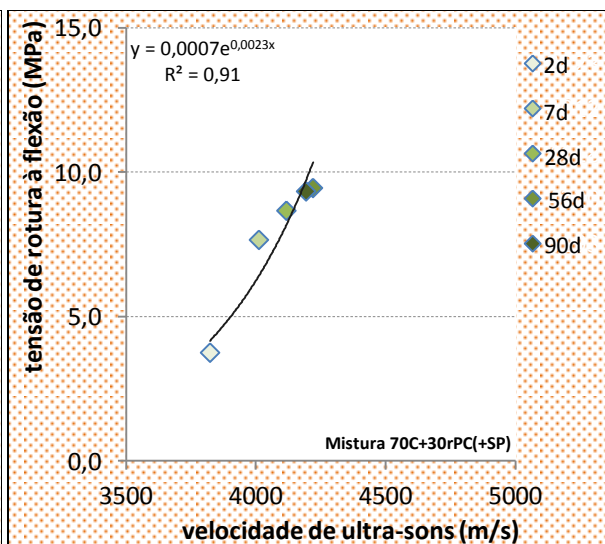
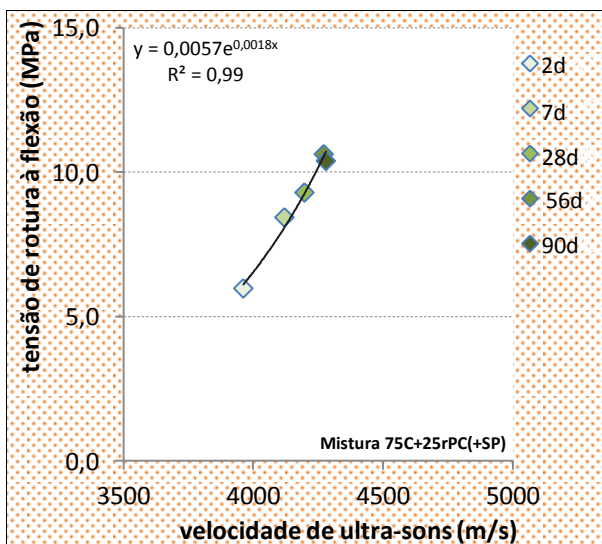
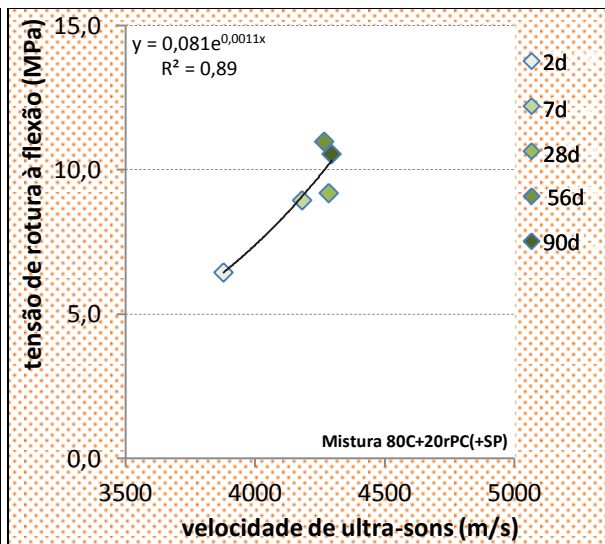
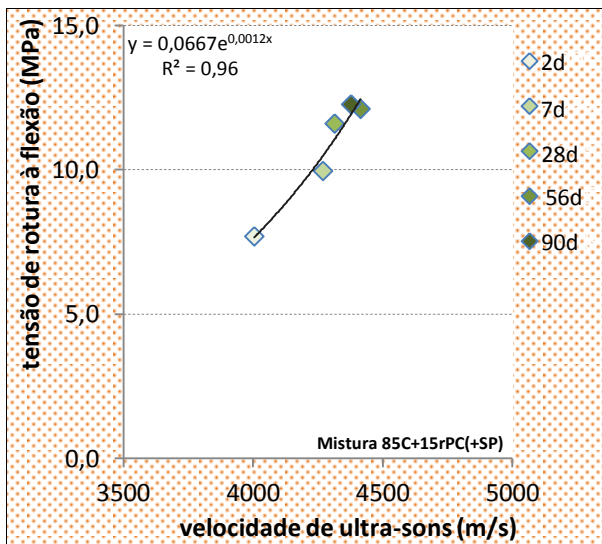
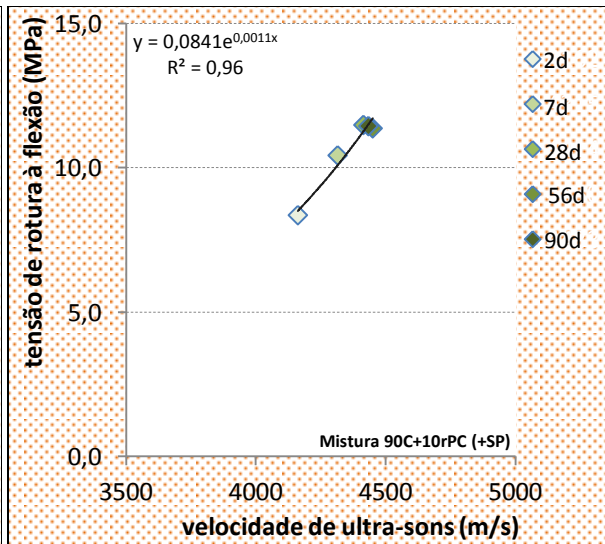
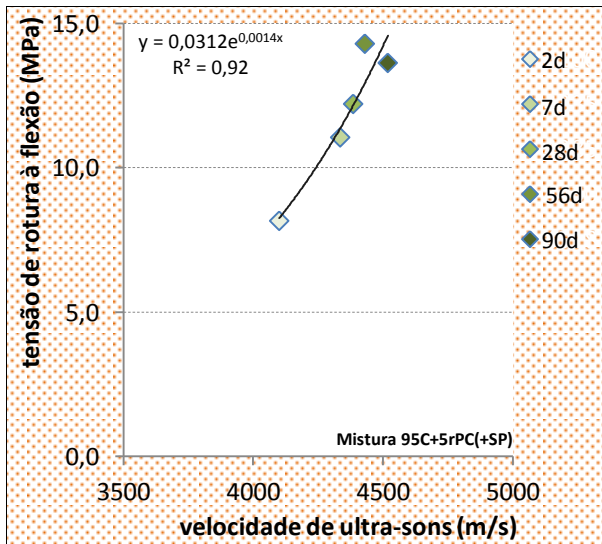


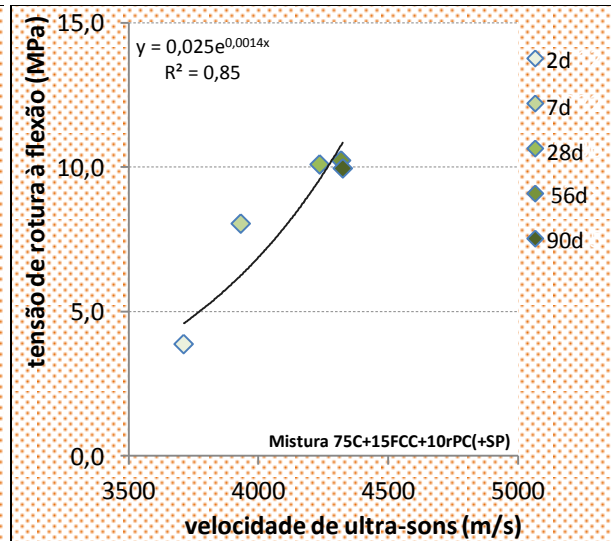
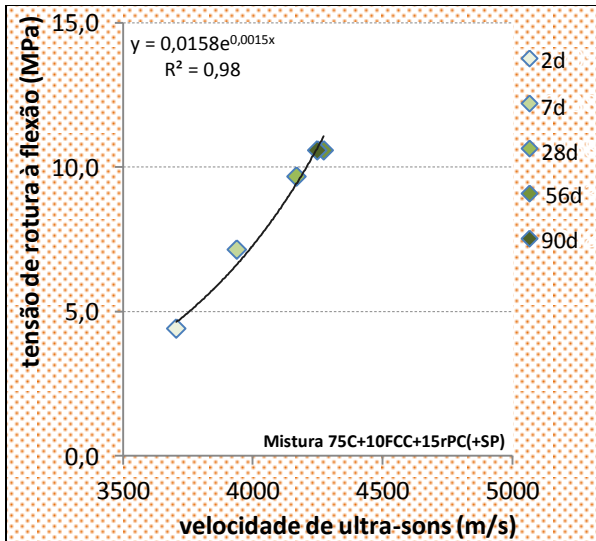
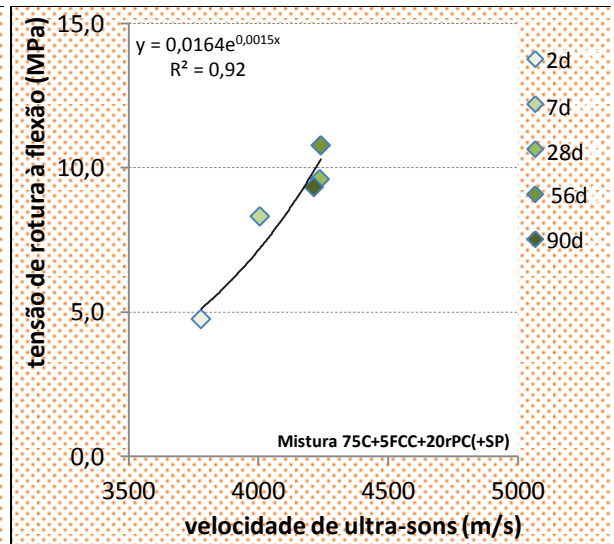
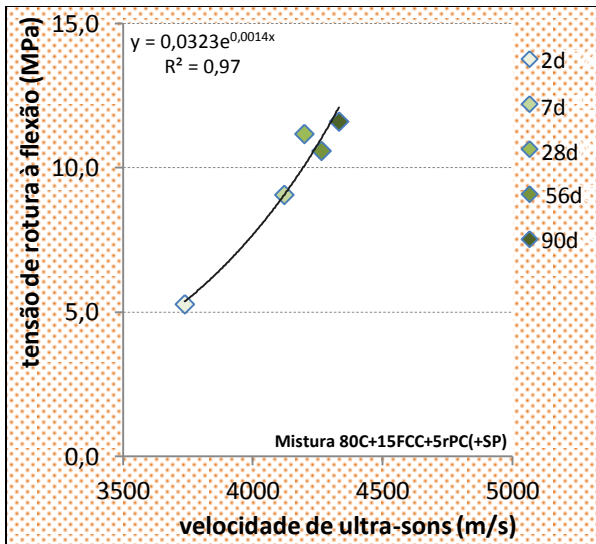
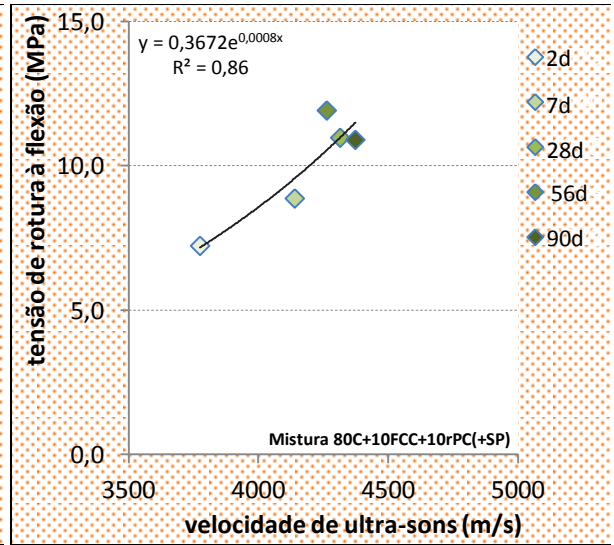
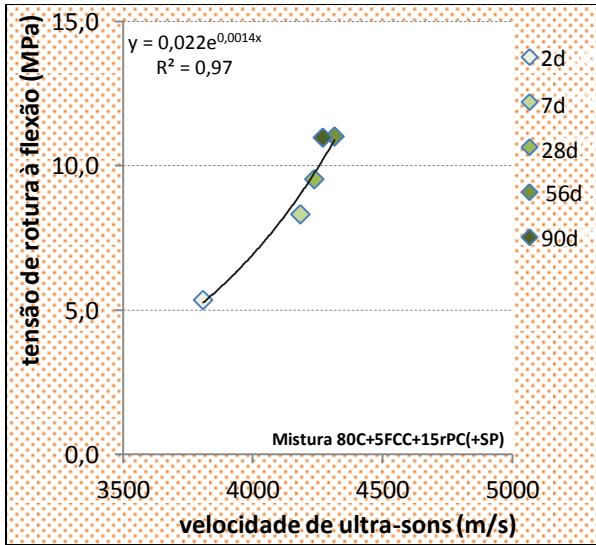


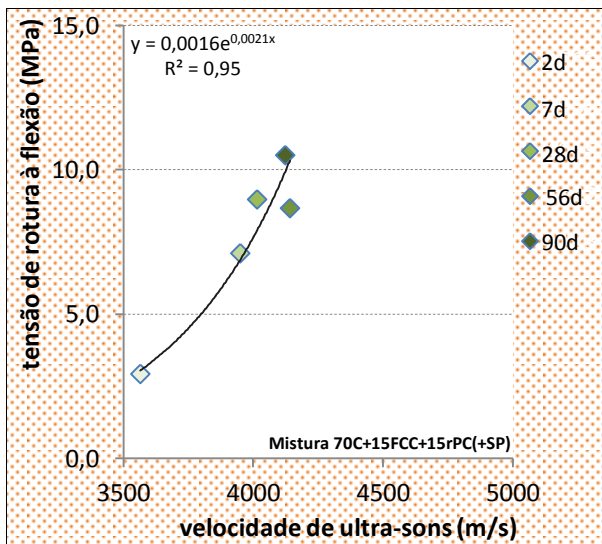
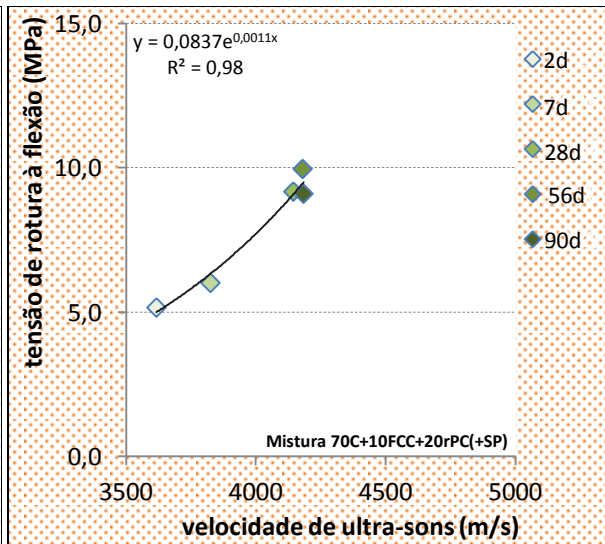
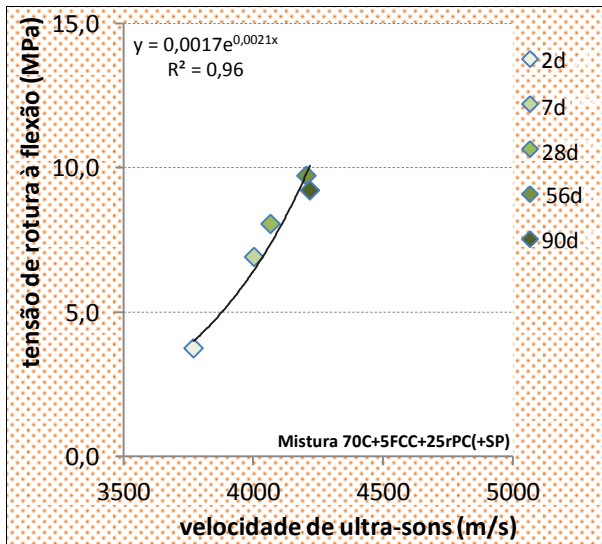


RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS E RESISTÊNCIA À FLEXÃO









**RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

