



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

# **EFEITO DA MOAGEM DO CATALISADOR EXAUSTO DE *CRACKING* CATALÍTICO NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS DE CIMENTO**

**Documento Definitivo**

DANIELA ALEXANDRA PEIXE AFONSO

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 da Graça Dias Alfaro Lopes, Prof. Coordenadora com Agregação (ISEL)

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

Licenciado, João Carlos Ferreira Chaves Pereira, Diretor do Laboratório central da Cimpor (Cimpor S.A.)

Janeiro 2013



## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho final de Mestrado constitui o finalizar de cinco anos de estudo. Como tal, reconheço o apoio de todas as pessoas que me acompanharam ao longo desta etapa.

À minha orientadora, Professora Doutora Carla Costa, por toda a ajuda ao longo da realização desta dissertação, nomeadamente, o apoio e a confiança transmitida durante o período da sua realização como também o espírito crítico e rigor demonstrados durante a sua análise e correção.

À Raquel e ao António, técnicos do laboratório de materiais de construção do ISEL, pela disponibilidade e auxílio demonstrados durante toda a campanha experimental. À Inês, pelo auxílio nas diretrizes do mapa de trabalhos, ensaios laboratoriais e disponibilidade demonstrada durante todo o percurso da realização desta dissertação. Ao Nuno, pela troca de informações e entreaajuda no decorrer dos ensaios e pesquisas.

À CIMPOR, pela disponibilização do cimento utilizado na campanha experimental como também pela moagem do resíduo utilizado nesta dissertação.

À Ciarga, em particular ao Eng.º José Costa, pela generosidade e disponibilidade demonstrada para aceder aos laboratórios que possibilitaram a realização do ensaio de aderência.

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

Aos amigos que me acompanharam durante este percurso académico e que me deram força nos momentos difíceis. Um agradecimento especial à Ana, ao Flávio, à Daniela, ao Gonçalo, ao Diogo e à Adriana.

Ao Rúben, pelo apoio incondicional, compreensão, paciência, ânimo e motivação durante a realização deste trabalho, bem como durante este cinco anos de estudos.

Por fim, agradeço à minha família, pois sem eles nada disto seria possível!

A todos um obrigado!



## RESUMO

Atualmente, o impacto ambiental gerado pela produção de cimento é uma das grandes preocupações a nível mundial. O seu processo de produção requer não só a utilização de quantidades significativas de recursos naturais não renováveis bem como de consumo de energia. Concomitantemente, a produção de cimento é a maior fonte de emissão antropogénica de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Desta forma, várias medidas têm sido concebidas com o intuito de diminuir estes impactos visando a preservação do meio ambiente. Uma dessas medidas consiste em substituir parcialmente cimento por resíduos industriais.

Neste sentido, com o presente trabalho pretendeu-se avaliar o efeito da moagem do catalisador exausto da unidade de “*cracking*” catalítico (FCC) - proveniente da refinaria da GALP, em Sines - nas propriedades de argamassas em que este resíduo substitui parcialmente o cimento. Na campanha experimental prepararam-se argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de FCC – entre os 0 a 15%, em massa – com três distribuições de tamanho de partículas de resíduo distintas. Na preparação destas argamassas adotaram-se duas abordagens experimentais que originaram duas séries de argamassas: numa das séries, a consistência das argamassas no estado fresco varia em função do teor de catalisador incorporado e na outra série, a consistência das argamassas é mantida constante através da adição de superplastificante, independentemente do teor de catalisador incorporado.

As propriedades das argamassas no estado fresco avaliadas foram: a consistência por espalhamento, o teor de ar e a massa volúmica. No estado endurecido avaliou-se: a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas nas argamassas, a resistência mecânica, a aderência e a absorção de água por capilaridade.

Com o presente estudo verifica-se que a utilização de resíduo moído como substituto parcial do cimento, aumenta a trabalhabilidade da argamassa para substituições de 15%. Para substituições de 5% e 10%, a moagem do resíduo não se apresenta sensível à trabalhabilidade. A moagem deste resíduo de FCC também não tem um efeito significativo nos valores de resistência à compressão das argamassas em que é incorporado, embora se verifique uma tendência para que os resíduos moídos conduzam a valores resistência à compressão mais elevados quando comparado com o não moído, particularmente quando a percentagem de incorporação do resíduo é mais elevada. A atividade pozolânica aumenta com a moagem do resíduo de FCC. A introdução de resíduo moído conduz à diminuição da absorção de água por capilaridade, à medida que a percentagem de substituição aumenta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Materiais à base de cimento; Resíduo de FCC; Moagem; Distribuição do tamanho de partícula, Impacto ambiental



## ABSTRACT

Currently, the environmental impact generated by the cement production is a major worldwide concern. The manufacturing process requires not only, the use of significant amounts of non-renewable resources as well as power consumption. The production of cement is the largest source of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere. Thus, in order to reduce these impacts and preserve the environment, several measures have been taken, one is to partially replace cement with other materials, such as industrial waste. In this sense, the purpose with the present work is to evaluate the effect of the grinding of the waste from the Fluidized Catalytic Cracking (FCC) unit - from the GALP refinery in Sines –when we use this waste to partially replace cement in mortars.

In this experience, mortars were prepared with partial replacement of cement with waste FCC - between 0 to 15% of replacement by waste - with three distinct distributions of waste particles (according to different particles size). In the preparation of the mortars, two different approaches were followed leading to the following:

- 1<sup>st</sup> approach - the consistency of the mortar varied depending on the amount of waste incorporated.
- 2<sup>nd</sup> approach, the consistency of the mortar was kept constant, with the use of superplasticizer, regardless of the amount of waste incorporated.

Both mortars were tested in their fresh and hardened state. The observed properties of the mortars in the fresh state were workability, air content and bulk density. The tests carried out with the mortars in the hardened state were the propagation velocity of ultrasonic waves, mechanical strength, adhesion and water absorption by capillarity.

With this study, it is concluded that when using a proportion of 15 % to replace cement by ground waste in mortars the workability increases when compared to the ungrounded waste. When using replacement proportions of 5% and 10%, no sensitivity to workability is noticed. Comparing all scenarios no relevant effect was observed concerning compressive strength of mortar, nevertheless this indicator is higher when using ground waste in particular when the concentration of ground waste is higher. The pozzolanic activity increases with the grinding of the FCC waste. In the water absorption by capillarity test, the addition of ground residue results in the improvement of this property, as the replacement percentage increases.

**KEYWORDS:** Cement-based materials; waste FCC catalyst; Grinding; Particle size distribution; Environmental impact



## ÍNDICE DO TEXTO

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA .....	2
1.2 OBJECTIVOS DO TFM .....	3
1.3 METODOLOGIA.....	3
1.4 ESTRUTURA DO TFM .....	4
2 ESTADO DO CONHECIMENTO .....	7
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	8
2.2 CONTROLO AMBIENTAL .....	9
2.2.1 A indústria do cimento e o ambiente.....	10
2.3 CIMENTOS CORRENTES .....	15
2.3.1 Hidratação do cimento.....	16
2.4 SUBSTITUTOS PARCIAIS DO CIMENTO .....	17
2.4.1 Catalisador exausto da indústria petroquímica .....	19
3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL .....	23
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	24
3.2 MATERIAIS.....	26
3.2.1 Cimento .....	26
3.2.2 FCC.....	27
3.2.3 Agregado .....	28
3.2.4 Água.....	29
3.2.5 Superplastificante.....	29
3.3 MÉTODOS DE ENSAIO .....	29
3.3.1 Definição da quantidade de superplastificante .....	29
3.3.2 Preparação da argamassa .....	31
3.3.3 Preparação dos provetes prismáticos .....	33
3.3.4 Preparação dos modelos em suportes de tijolo.....	35

3.3.5	Ensaio no estado fresco.....	38
3.3.6	Ensaio no estado endurecido .....	44
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....		57
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	58
4.2	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	59
4.2.1	Consistência por espalhamento.....	59
4.2.2	Massa volúmica.....	63
4.2.3	Teor de ar .....	67
4.3	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	73
4.3.1	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas .....	73
4.3.2	Resistência Mecânica .....	80
4.3.3	Aderência – Arrancamento por tracção.....	101
4.3.4	Absorção de água por capilaridade.....	107
5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....		115
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	116
5.2	CONCLUSÕES GERAIS .....	116
5.2.1	Ensaio no estado fresco.....	117
5.2.2	Ensaio no estado endurecido .....	119
5.3	PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	122

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Compostos principais do clínquer Portland, Adaptado de [7, 24].	12
Quadro 3.1 - Designação adotada para as argamassas efetuadas em função da composição.	25
Quadro 3.2 - Ensaio realizado para caracterização das argamassas, as normas seguidas para a sua realização bem como, os subcapítulos desta dissertação em que os ensaios são descritos.	26
Quadro 3.3 - Composição granulométrica da areia de referência CEN.	28
Quadro 3.4 - Quantidades de superplastificante necessários a cada argamassa.	30
Quadro 3.5 - Material e utensílios usados na preparação das argamassas.	31
Quadro 3.6 - Material e utensílios necessários para obtenção de provetes prismáticos.	33
Quadro 3.7 – Material e utensílios necessários para a obtenção de tijolos revestidos.	36
Quadro 3.8 - Material e utensílios necessários para a determinação da consistência das argamassas por espalhamento.	39
Quadro 3.9- Material e utensílios necessários na determinação da massa volúmica.	41
Quadro 3.10 -Material e utensílios necessários na determinação do teor de ar.	43
Quadro 3.11- Material e utensílios utilizados na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.	45
Quadro 3.12 -Materiais necessários à realização do ensaio de resistência mecânica.	47
Quadro 3.13 – Material e utensílios necessários à realização do ensaio de arrancamento por tração.	50
Quadro 3.14 – Material e utensílios necessários para realização do ensaio de absorção de água por capilaridade.	53
Quadro 4.1 - Consistência por espalhamento das argamassas em estudo e respectiva quantidade de superplastificante adicionado a cada argamassa.	60
Quadro 4.2 - Massa volúmica das argamassas em estudo.	64
Quadro 4.3 - Teor de ar obtido para as argamassas de referência e para as argamassas com substituição parcial do cimento para as diferentes séries presentes na campanha experimental.	68
Quadro 4.4 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas (m/s) obtidas para as argamassas da série teor de SP constante.	73

Quadro 4.5 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas (m/s) obtidas para as argamassas da série consistência constante.....	74
Quadro 4.6- Tensão média de rotura por flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas formuladas. ....	81
Quadro 4.7 - Tensão média de rotura por compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas formuladas. ....	86
Quadro 4.8 - Quadro-resumo dos valores da resistência à compressão para as argamassas em estudo e verificação dos requisitos mecânicos impostos pela norma NP EN 197-1. ....	94
Quadro 4.9 - Relação entre as resistências mecânicas (Rf/Rc) avaliadas ao longo do tempo de cura e Relação entre Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e resistência à compressão por idade de cura para as argamassas com teor de SP constante. ....	95
Quadro 4.10 - Relação entre as resistências mecânicas (Rf/Rc) avaliadas ao longo do tempo de cura e Relação entre Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e resistência à compressão por idade de cura para as argamassas consistência constante.....	96
Quadro 4.11 -Índice de atividade pozolânica para as argamassas que constituem a série teor de SP constante.....	98
Quadro 4.12 - Índice de Atividade pozolânica para as argamassas que constituem a série consistência constante.....	99
Quadro 4.13 – Tensão de aderência – Arrancamento por tração (N/mm <sup>2</sup> ) e zonas de rotura obtidas para as argamassas em estudo. ....	101
Quadro 4.14 - Coeficiente de Capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> ) para as diferentes argamassas em estudo.....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Concentração de dióxido de carbono e valores de temperatura nos últimos 400 000 anos, na atmosfera [18]. .....	9
Figura 2.2 - Esquema geral do processo de fabrico de cimento, Adaptado de [19]. .....	10
Figura 2.3- Produção global de cimento, Adaptado de [27]. .....	13
Figura 2.4 - Principais tipos de cimento (CEM). .....	15
Figura 2.5 - Classificação dos substitutos do clínquer de acordo com a sua reatividade química. ....	17
Figura 3.1 - a) Cuidados no acondicionamento do cimento; b) Características: Tipo de cimento (CEM I 42,5 R), data e silo a que corresponde; c) Cimento Portland CEM I 42,5R utilizado na realização da campanha experimental. ....	27
Figura 3.2 - Dimensões médias das partículas de cimento e das diferentes amostras de FCC utilizadas .....	27
Figura 3.3 - Análise granulométrica por difração de raios laser efetuada sobre os ligantes (cimento CEM I 42,5 R e resíduo de FCC. ....	28
Figura 3.4 - Etapas necessárias à preparação de argamassa. a) Misturadora mecânica; b) Constituintes da argamassa; c) Preparação das porções necessárias, antes da realização do ensaio; d) Introdução do agregado na cuba; e) Início do funcionamento da misturadora; f) Raspagem da argamassa aderente às paredes e ao fundo da cuba; g) Finalização do fabrico de argamassa. ....	32
Figura 3.5 - Preparação dos provetes prismáticos. a) Mesa de compactação mecânica; b) Aplicação de óleo descofrante no molde; c) Colocação do molde na mesa de compactação; d) Colocação da 1ª camada de argamassa; e) Recolha do excesso de argamassa com espátula; f) Regularização da superfície; g) Aspeto final do molde; h) Moldes na câmara de cura. ....	34
Figura 3.6 - Desmoldagem dos provetes prismáticos. a) Identificação dos provetes; b) Pesagem dos provetes; c) Colocação dos provetes em cura até à data do ensaio. ....	35
Figura 3.7 - Etapas para realização dos moldes com suporte de tijolo. a) Material necessário para a preparação dos tijolos revestidos; b) Aplicação da argamassa com colher de pedreiro; c) Suporte totalmente revestido com argamassa; d) Regularização da superfície; e) Regularização dos extremos do suporte; f) moldes após desmoldagem; g) Provetes com suporte de tijolo na câmara de cura. ....	37
Figura 3.8 - Etapas para a realização da camada de chapisco. a) Humedecimento do suporte; b) Aplicação da argamassa; c) e d) Camada de chapisco finalizada. ....	38

Figura 3.9 - Etapas do ensaio de consistência por espalhamento. a) Mesa de espalhamento; b) Colocação da 1ª camada de argamassa; c) Compactação com pilão de madeira da 1ª camada; d) Colocação da 2ª camada de argamassa; e) Compactação da 2ª camada de argamassa; f) Regularização da superfície; g) Limpeza dos resíduos de argamassa; h) Levantamento do molde tronco- cônico; i) Execução das 15 pancadas; j) Medição do espalhamento com régua metálica. ....	40
Figura 3.10 - Etapas do ensaio de massa volúmica. a) Pesagem do recipiente vazio; b) colocação da 1ª camada de argamassa; c) compactação da 1ª camada; d) recipiente totalmente preenchido de argamassa; e) Regularização da superfície; f) Limpeza dos detritos de argamassa; f) Pesagem do recipiente com argamassa. ....	42
Figura 3.11 - Etapas do ensaio de determinação do teor de ar. a) Aerómetro; b) Recipiente com argamassa; c) Colocação do aerómetro sobre o recipiente com argamassa; d) Injeção de água no aerómetro; e) Bombeamento; f) Correção do valor até zero; g) Início do teste e leitura do teor de ar; h) Finalização do ensaio. ....	44
Figura 3.12 - Etapas do ensaio de determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. a) Instalação experimental na realização do ensaio; b) Pesagem dos provetes prismáticos; c) Aplicação de vaselina nos transdutores; d) Calibração do aparelho; e) Aplicação de vaselina no provete; f) Determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas; g) Osciloscópio. ....	46
Figura 3.13- Etapas do ensaio de determinação da resistência mecânica. a) Máquina do ensaio de resistência mecânica; b) Máquina de resistência à flexão; c) Posicionamento do prisma para flexão; d) Determinação da resistência À flexão; e) Máquina de resistência à compressão; f) Posicionamento do semi-prisma para compressão; g) Determinação da resistência à compressão. ....	49
Figura 3.14 - Preparação dos provetes para a realização do ensaio. a) Marcação dos provetes; b) Corte dos provetes; c) Provete após o corte; d) Limpeza dos detritos resultantes do corte; e) Aplicação de cola na zona de inserção da bolacha metálica; f) Aplicação de cola na bolacha metálica; g) Fixação da bolacha metálica na argamassa; h) Aspeto final dos provetes antes na realização do ensaio. ....	51
Figura 3.15 - Etapas do ensaio de arrancamento por tração- Aderência. a) Máquina de ensaio de aderência; b) Provetes na câmara de cura, antes da realização do ensaio; c) Aplicação da força de tração na bolacha metálica; d) Arrancamento da bolacha metálica; e) Bolacha metálica após arrancamento; f) e g) Aspeto dos provetes após realização do ensaio. ....	52
Figura 3.16 - Preparação dos provetes para a realização do ensaio de capilaridade. a) Estufa; b) Pesagem dos provetes até massa constante; c) Identificação dos provetes antes do corte; d) Marcação dos provetes; e) Corte dos provetes; f) Provetes após o corte; g) Aplicação da tinta impermeabilizante; h) Provetes antes da colocação do exsicador; i) Provetes no exsicador até à data do ensaio. ....	54

Figura 3.17 - Etapas do ensaio de determinação do ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Pesagem dos provetes antes da realização do ensaio; b) Provetes após pesagem; c) Início do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	55
Figura 4.1 - Consistência por espalhamento (mm) para as argamassas da série teor de SP constante.....	60
Figura 4.2 - Consistência por espalhamento (mm) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série Teor de SP constante, por distribuição do tamanho de partícula do resíduo adicionado.....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Figura 4.3 - Consistência por espalhamento (mm) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série Teor de SP constante, por percentagem de resíduo adicionado.....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Figura 4.4 – Quantidade de SP (g) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série Consistência constante, por percentagem de resíduo adicionado.....	62
Figura 4.5 – Quantidade de SP (g) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série Consistência constante, por distribuição do tamanho de partícula do resíduo adicionado. ....	62
Figura 4.6 - Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ) das diferentes argamassas em estudo. ....	64
Figura 4.7 - Massa volúmica e respetivas retas de regressão linear das argamassas referentes à série teor de SP constante, por percentagem de resíduo adicionado.....	65
Figura 4.8 - Massa volúmica e respetivas retas de regressão linear das argamassas referentes à série teor de SP constante, por distribuição do tamanho de partícula de resíduo adicionado..	65
Figura 4.9 - Relação entre a massa volúmica e a consistência por espalhamento das argamassas da série com teor de SP constante.....	66
Figura 4.10 - Massa volúmica e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por percentagem de resíduo adicionado. ....	67
Figura 4.11 - Massa volúmica e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por distribuição do tamanho de partícula de resíduo adicionado. ....	67
Figura 4.12 - Teor de ar (%) das argamassas estudadas. ....	68
Figura 4.13 - Teor de ar e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série teor de SP constante, por percentagem de resíduo adicionado.....	69
Figura 4.14 - Teor de ar e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série teor de SP constante, por dimensão de partícula do resíduo adicionado. ....	69
Figura 4.15 - Relação entre o teor de ar e massa volúmica das argamassas da série com teor de SP constante.....	70

Figura 4.16 - Teor de ar e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por percentagem de resíduo adicionado. ....	71
Figura 4.17 - Teor de ar e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por dimensão da partícula de resíduo adicionado. ....	71
Figura 4.18 - Relação entre o teor de ar e massa volúmica das argamassas da série com consistência constante. ....	72
Figura 4.19 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas da série teor de SP constante, utilizando transdutores de 54 kHz. ....	75
Figura 4.20 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta não moído- série teor de SP constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz. ....	76
Figura 4.21 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta moído 1x- série teor de SP constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz. ....	76
Figura 4.22 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta moído 2x- série teor de SP constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz. ....	77
Figura 4.23 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas da série consistência constante, utilizando transdutores de 54 kHz. ....	77
Figura 4.24 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta não moído- série consistência constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz. ....	78
Figura 4.25 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta moído 1x- série consistência constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz. ....	79
Figura 4.26 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta moído 2x- série consistência constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz. ....	79
Figura 4.27 - Tensão média de rotura por flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas que constituem a série com teor de SP constante. ....	81
Figura 4.28 - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 5%, na tensão média de rotura à flexão. ....	82
Figura 4.29 - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 10%, na tensão média de rotura à flexão. ....	82

Figura 4.30 -Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 15%, na tensão média de rotura à flexão. ....	82
Figura 4.31 - Tensão média de rotura por flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas que constituem a série com consistência constante. ....	84
Figura 4.32 -Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de resíduo de FCC de 15% na tensão média de rotura à flexão. ....	85
Figura 4.33 - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de resíduo de FCC de 5% na tensão média de rotura à flexão. <b>Erro! Marcador não definido.</b>	
Figura 4.34 - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de resíduo de FCC de 10% na tensão média de rotura à flexão. ....	85
Figura 4.35 - Tensão média de rotura por compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas que constituem a série com teor de SP constante. ....	87
Figura 4.36 - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 5% na tensão média de rotura à compressão. ....	88
Figura 4.37 - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 10% na tensão média de rotura à compressão. ....	88
Figura 4.38 - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 15% na tensão média de rotura à compressão. ....	88
Figura 4.39 - Tensão média de rotura por compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas que constituem a série com consistência constante. ....	91
Figura 4.40 - Influência da distribuição média do tamanho partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 5% na tensão média de rotura à compressão. ....	92
Figura 4.41 - Influência da distribuição média do tamanho partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 10% na tensão média de rotura à compressão. ....	92
Figura 4.42 - Influência da distribuição média do tamanho partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 15% na tensão média de rotura à compressão ....	92
Figura 4.43 – Tensão média de aderência (N/mm <sup>2</sup> ) para as diferentes séries das argamassas em estudo.....	102
Figura 4.44 - Tensão média de aderência (N/mm <sup>2</sup> ) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série teor de SP constante, por percentagem de resíduo adicionado. ....	103

Figura 4.45 - Tensão média de aderência (N/mm <sup>2</sup> ) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série teor de SP constante, por distribuição do tamanho de partícula do resíduo adicionado.....	103
Figura 4.46 - Comparação dos resultados da tensão média de aderência com e sem camada de chapisco para as argamassas incorporação de resíduo de FCC não moído da série teor de SP constante.....	104
Figura 4.47 - Tensão média de aderência (N/mm <sup>2</sup> ) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por percentagem de resíduo adicionado. ....	105
Figura 4.48 – Tensão média de aderência (N/mm <sup>2</sup> ) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por distribuição do tamanho de partícula do resíduo adicionado.....	105
Figura 4.49 - Comparação entre a tensão média de aderência com e sem camada de chapisco para as argamassas com FCC não moído da série consistência constante.....	106
Figura 4.50- Coeficiente de Capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> ) das argamassas em estudo para as diferentes séries.....	107
Figura 4.51 - Relação entre o coeficiente de absorção de água por capilaridade e a tensão média de rotura por compressão das argamassas em estudo aos 28 dias de hidratação. ....	109
Figura 4.52 - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas teor de SP, por 5% de resíduo adicionado.....	110
Figura 4.53 - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas teor de SP, por 10% de resíduo adicionado.....	110
Figura 4.54 - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas teor de SP, por 15% de resíduo adicionado.....	110
Figura 4.55 - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas com consistência constante, por 5% de resíduo adicionado.....	112
Figura 4.56 - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas com consistência constante, por 10% de resíduo adicionado.....	112
Figura 4.57 - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas com consistência constante, por 15% de resíduo adicionado.....	113

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

### SIGLAS

---

- AFNOR – Associação Francesa de Normalização
- ASE – Área superficial específica
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- B.E.T – Brunauer-Emmett-Teller
- CEM – Cimentos correntes
- CEN – Areia Normalizada de Referência
- CIARGA – Empresa: Argamassas secas S.A.
- CIMPOR – Empresa: Cimentos de Portugal
- DTP – Distribuição do tamanho de partícula
- EN – Norma Europeia
- FCC- Catalisador da unidade de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (*FCC* é a abreviatura adotada genericamente a partir da designação da unidade em inglês “*Fluid Catalytic Cracking*”)
- GEE- Gases com efeito de estufa
- IA – Índice de atividade pozolânica
- ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- NBR – Norma Brasileira
- NF – Norma Francesa
- NP – Norma Portuguesa
- SNL – *Société Nouvelle du Littoral*
- SP- Superplastificante
- TFM – Trabalho Final de Mestrado
- WBCDS - *World Business Council for Sustainable Development*

### DESIGNAÇÃO DAS ARGAMASSAS

---

- x\_SP – Designação atribuída às argamassas que contêm resíduo não moído em que x representa o teor de incorporação de resíduo de FCC e SP representa a série teor de SP constante

- $x_{My\_SP}$  – Designação atribuída às argamassas em que  $x$  representa o teor de incorporação de resíduo de FCC,  $y$  representa a quantidade de vezes que o resíduo foi submetido ao processo de moagem e  $SP$  representa a série teor de  $SP$  constante
- $x_C$  – Designação atribuída às argamassas que contêm resíduo não moído em que  $x$  representa o teor de incorporação de resíduo de FCC e  $C$  representa a série consistência constante
- $x_{My\_C}$  – Designação atribuída às argamassas em que  $x$  representa o teor de incorporação de resíduo de FCC,  $y$  representa a quantidade de vezes que o resíduo foi submetido ao processo de moagem e  $C$  representa a série consistência constante

## ABREVIATURAS

---

- $c$  – Coeficiente absorção de água por capilaridade ( $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ )
- $d_m$  – Diâmetro de espalhamento médio (mm)
- $F_a$  – Tensão de aderência ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
- $F_c$  – Força de compressão (kN)
- $F_f$  – Força de flexão (kN)
- $F_r$  – Força de aderência (N)
- $\rho_m$  – Massa volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $R_c$  – Resistência à compressão (MPa)
- $R_f$  – Resistência à flexão (MPa)
- $t$  – tempo decorrido no percurso da onda ( $\mu\text{s}$ )
- $v$  – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (m/s)

## NOTAÇÃO DOS COMPOSTOS QUÍMICOS

---

- $C_3S$  – Silicato tricálcico
- $C_2S$  – Silicato bicálcico
- $C_3A$  – Aluminato tricálcico
- $C_4AF$  – Aluminoferrato tetracálcico
- $CH$  – Hidróxido de cálcio
- $C-S-H$  – Silicato de cálcio hidratado

# 1

# Introdução

*“O mundo é um laboratório para uma mente inquiridora”*

Martin H. Fisher

## 1.1 ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

O aumento populacional que se assistiu ao longo do último século fez com que se adotassem novas estratégias com vista a um desenvolvimento sustentável que incluía a utilização dos recursos disponíveis de forma mais racional. Adicionalmente, devido ao rápido crescimento da economia existe, à escala mundial, a necessidade de gerir os problemas económicos e ambientais.

A indústria da construção é uma das maiores consumidoras de recursos naturais não renováveis e promove a emissão de gases poluentes para a atmosfera. Dentro deste sector insere-se a indústria do cimento, que é uma das responsáveis por parte significativa do CO<sub>2</sub> produzido, sendo que cada tonelada de cimento produzido, implica a libertação de outra tonelada de CO<sub>2</sub> para a atmosfera [1]. Além disso, esta indústria usa quantidades significativas de recursos naturais não renováveis, nomeadamente, argila e calcário.

Com o objectivo de contribuir para a redução dos problemas enunciados acima, a comunidade científica identificou a importância de focar os seus estudos no desenvolvimento de novos ligantes hidráulicos que, concomitantemente, recorram a menor consumo de recursos naturais não renováveis e que tenham menores emissões de CO<sub>2</sub>. Ligantes hidráulicos com estas características podem ser obtidos com a substituição parcial de cimento por resíduos industriais [2].

As unidades de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (em inglês “*Fluid Catalytic Cracking*”, *FCC*) presentes em algumas refinarias de petróleo produzem um resíduo que se designa correntemente por catalisador exausto de FCC. Este resíduo contém teores significativos de alumina que lhe confere propriedades pozolânicas e portanto, tem potencial de utilização como substituto parcial do cimento [3, 4, 5, 6] .

Estudos anteriores realizados no âmbito de um projeto de I&D, atualmente em curso no ISEL, revelaram que o resíduo de FCC produzido na refinaria da Petrogal, em Sines, quando incorporado tal como recebido, em argamassas apresenta atividade pozolânica significativa, particularmente, para teores de substituição parcial de cimento até 15% (em massa) [7, 8, 9, 10].

## 1.2 OBJECTIVOS DO TFM

A presente dissertação visa a utilização de novos materiais à base de cimento utilizando resíduos sólidos industriais, neste caso, o catalisador exausto da indústria petroquímica - resíduo de FCC. Esta tem como base a continuação de trabalhos experimentais realizados anteriormente de forma a complementar o conhecimento já adquirido relativamente às propriedades destes novos materiais que visam a dependência do consumo de cimento [7, 8, 9, 10].

A dimensão das partículas dos materiais pozolânicos pode influenciar as propriedades dos materiais em que são incorporados [11, 12, 13, 6]. Neste sentido, dando continuidade às atividades de pesquisa anteriormente realizadas, propõem-se neste trabalho alterar a dimensão das partículas do resíduo de FCC, relativamente à dimensão com que são recebidos da refinaria, com o intuito de avaliar o efeito da variação da distribuição do tamanho das partículas de catalisador exausto de “cracking” catalítico nas propriedades das argamassas de cimento.

Adicionalmente pretendeu-se avaliar as alterações provocadas nas propriedades da argamassa em estudo pelo facto de se adotarem duas abordagens diferentes de preparação das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de FCC. Ou seja, avaliaram-se os resultados obtidos nas propriedades das argamassas quando se alterou a consistência das argamassas no estado fresco e quando se impôs a mesma consistência às argamassas através da utilização de superplastificante (SP).

## 1.3 METODOLOGIA

Previamente à iniciação dos trabalhos de investigação laboratorial realizou-se uma pesquisa aprofundada sobre o resíduo em estudo, nomeadamente, os trabalhos realizados até ao momento e redigiu-se um documento que serviu de proposta de plano de trabalho final de mestrado e de base à elaboração do segundo capítulo desta dissertação.

De seguida, após obter a devida informação sobre o assunto a estudar realizou-se um mapa de trabalhos de forma a calendarizar as atividades a realizar no laboratório de modo a garantir o tempo previsto para a realização da dissertação (Anexo B.1).

Tendo em conta o exposto anteriormente, iniciou-se o trabalho laboratorial que se desenvolveu essencialmente em duas fases principais:

- I. Determinação da quantidade de superplastificante necessário a cada argamassa de forma a ser mantida a consistência igual à da argamassa de referência.
- II. Iniciação da campanha experimental propriamente dita, que incluiu, além das argamassas que se pretendeu estudar, amostras de referência contendo apenas cimento corrente com e sem incorporação de superplastificante que serviram de comparação às argamassas preparadas.

Para todas as argamassas formuladas, incluindo as de referência, foram realizados ensaios no estado fresco e ensaios no estado endurecido. Os ensaios de estado fresco realizados foram a consistência por espalhamento, massa volúmica e teor de ar. Os ensaios realizados no estado endurecido foram a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, resistência mecânica – por flexão e compressão –, aderência e absorção de água por capilaridade.

Paralelamente à realização da campanha experimental fez-se o tratamento de dados e iniciou-se a redação da dissertação.

## **1.4 ESTRUTURA DO TFM**

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos que se apresentam abaixo de forma resumida.

No primeiro e presente capítulo efetua-se o enquadramento do trabalho, os objetivos, a metodologia adotada bem como a organização da informação ao longo do trabalho.

No segundo capítulo é realizada uma abordagem teórica do estado do conhecimento no âmbito das propriedades das argamassas de cimento com adição do resíduo da indústria petroquímica. Neste expõem-se a problemática e a importância desta investigação para as indústrias de fabrico de cimento. Evidencia-se ainda neste capítulo a origem do resíduo em estudo bem como as conclusões dos trabalhos já realizados no âmbito desta dissertação.

No terceiro capítulo expõe-se o trabalho experimental desenvolvido através da descrição do método de produção de argamassa, da realização dos provetes e das metodologias de ensaio com as respetivas referências normativas. A campanha experimental pode ser dividida em duas fases, a primeira que tem como objetivo o estudo da quantidade de superplastificante a

usar em cada argamassa, de forma a manter a consistência pretendida e a segunda fase que se prende com ensaios propriamente ditos. Salienta-se ainda que todos os procedimentos descritos se encontram sustentados por imagens fotográficas de forma a complementar o descrito.

No quarto capítulo desta dissertação expõe-se a apresentação, discussão e análise resultados obtidos ao longo da campanha experimental. Neste realiza-se a caracterização das argamassas, ao nível das propriedades mecânicas e físicas efetuando uma análise crítica e comparativa com resultados obtidos por outros autores sendo esta análise sustentada por representações gráficas e quadros. Sempre que possível, foram ainda estabelecidas correspondências entre os vários ensaios realizados para uma melhor compreensão das argamassas em estudo.

O quinto e último capítulo sintetiza a análise dos resultados obtidos, apresentando as conclusões gerais do trabalho desenvolvido bem como as propostas de desenvolvimentos futuros neste âmbito.

Ainda no fim do trabalho, excetuando as referências bibliográficas, apresentam-se alguns anexos com informação complementar, por forma de permitir uma análise mais pormenorizada do exposto na presente dissertação.



# 2

## Estado do Conhecimento

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão  
uma gota de água no mar. Mas seria menor se lhe faltasse  
uma gota”*

Madre Teresa de Calcuta

## 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O cimento enquanto constituinte do betão é considerado um material-chave para satisfazer as necessidades atuais do património edificado nomeadamente no que se refere à construção de habitações e infraestruturas (túneis, pontes e viadutos). Devido à sua utilização generalizada surge, como consequência, a necessidade da indústria do cimento conservar os recursos energéticos, bem como reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Desta forma, a redução da produção e utilização de clínquer – um dos produtos intermediários para a produção de cimento – é uma prioridade nos dias de hoje, uma vez que constitui uma alternativa para a diminuição das emissões desse gás. Neste sentido, é importante a descoberta e a otimização da utilização de novos materiais capazes de substituir parcialmente o cimento sem que sejam perdidas as propriedades dos produtos finais. Um dos materiais promissores para este fim é o catalisador exausto da unidade de cracking catalítico (FCC) da refinação de petróleo [7, 8, 9, 10, 14].

O presente capítulo tem como finalidade enquadrar o contributo do estudo efetuado nesta dissertação – nomeadamente, a avaliação do efeito da moagem das partículas do catalisador exausto de FCC nas propriedades de argamassas em que é incorporado – com vista à otimização da produção, em larga escala, de novos materiais à base de cimento com menores impactos ambientais. Estes materiais traduzem-se em benefícios para a sociedade.

Inicialmente descrevem-se as fases do processo de fabrico do cimento, pondo em destaque as etapas que originam os impactos ambientais associados a esta indústria (Subsecção 2.2.1.1), bem como as possíveis medidas de mitigação destes problemas (Subsecção 2.2.1.2). Evidencia-se a constituição química do cimento e os cimentos habitualmente comercializados na união europeia que estão definidos pela normalização (Subcapítulo 2.3), com intuito de compreender não só as propriedades do material em estudo – o cimento – mas também salientar os requisitos para que a sua viabilidade na construção seja reconhecida. Realçam-se ainda os processos de hidratação do cimento com o intuito de compreender as transformações verificadas no cimento ao longo do seu processo de endurecimento (Secção 2.3.1).

Por fim, expõem-se alternativas para a redução dos impactos ambientais originados pela produção de cimento, apresentando-se o estado atual de conhecimento para a potencial utilização do catalisador exausto de FCC (Secção 2.4.1), resíduo em estudo no presente trabalho.

## 2.2 CONTROLO AMBIENTAL

Ao longo do último século a preocupação com questões de carácter ambiental torna-se cada vez mais acentuada. A denominação “alterações climáticas” é cada vez mais conhecida e entende-se pelo conjunto de mudanças, ocorridas ao longo do tempo, decorrentes do aquecimento da atmosfera que resulta direta ou indiretamente de ações antropogénicas. O aquecimento global é uma realidade e nos últimos 100 anos a temperatura média global aumentou cerca de  $0,6^{\circ}\text{C}$  [15]. A comunidade científica atribui como causa maioritária desta problemática os gases com efeito de estufa (GEE). Os GEE também se produzem na Natureza, mas na atualidade são-no maioritariamente pela via da combustão de reservas fósseis (carvão, petróleo e gás natural), com fins de produção energética, que sustenta os elevados níveis de consumo mundiais. Dado que as quantidades atuais de GEE emitidos para a atmosfera são superiores à sua capacidade de depuração verifica-se um aumento progressivo da sua concentração. As diferentes quantidades em que os gases são emitidos por diversas atividades humanas, as concentrações que atingem na atmosfera e a diferença no seu potencial de aquecimento permitem concluir, embora com alguma imprecisão quantitativa, que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ) são os compostos que mais contribuem para o Aquecimento Global [16].

No sentido de reverter as tendências atuais, foi criado o protocolo de Quioto em 1997, que tem como finalidade o estabelecimento medidas com vista à redução da emissão dos GEE [17].

Como dito anteriormente, o  $\text{CO}_2$  é um dos gases que contribui para o Aquecimento Global, sendo o presente trabalho elaborado com a finalidade de produzir novos materiais à base de cimento como forma de diminuir as emissões de  $\text{CO}_2$ . A Figura 2.1 ilustra a correlação entre a concentração do  $\text{CO}_2$  e a temperatura do ar nos últimos 400 000 anos na atmosfera.

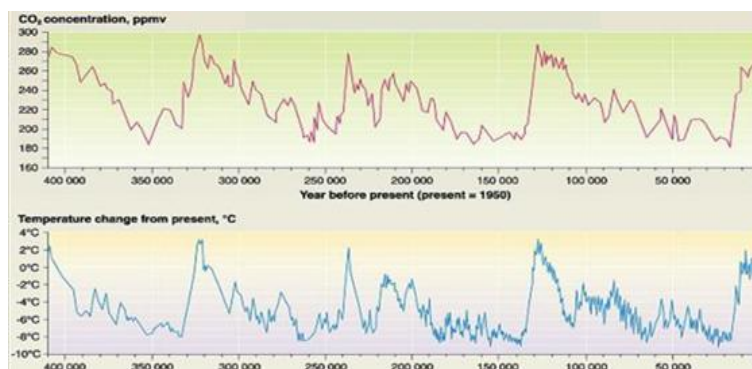


Figura 2.1 - Concentração de dióxido de carbono e valores de temperatura nos últimos 400 000 anos, na atmosfera [18].

Através da observação da Figura 2.1 conclui-se que a temperatura da atmosfera está diretamente relacionada com a concentração de dióxido de carbono, ou seja, para uma maior concentração de CO<sub>2</sub> existe uma maior temperatura. Por outro lado, constata-se ainda que tanto o aumento da temperatura como a concentração de CO<sub>2</sub> apresentam valores elevados no presente.

A produção de cimento tem um papel fundamental neste aumento uma vez que este processo é responsável por cerca de 5% das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, sendo que com a produção de uma tonelada de cimento é libertada outra tonelada deste gás para a atmosfera [1].

## 2.2.1 A indústria do cimento e o ambiente

### 2.2.1.1 Processos de produção do cimento

A indústria do cimento é uma atividade que apresenta um elevado potencial poluidor, havendo fontes de poluição em todas as etapas do processo – obtenção das matérias-primas, moagem do cru, cozedura, moagem do cimento e expedição.

As principais fases na produção de cimento Portland apresentam-se num esquema na Figura 2.2, sendo de seguida analisada cada uma das fases e associados os impactos ambientais. As possíveis medidas de mitigação apresentam-se na Subsecção 2.2.1.2.

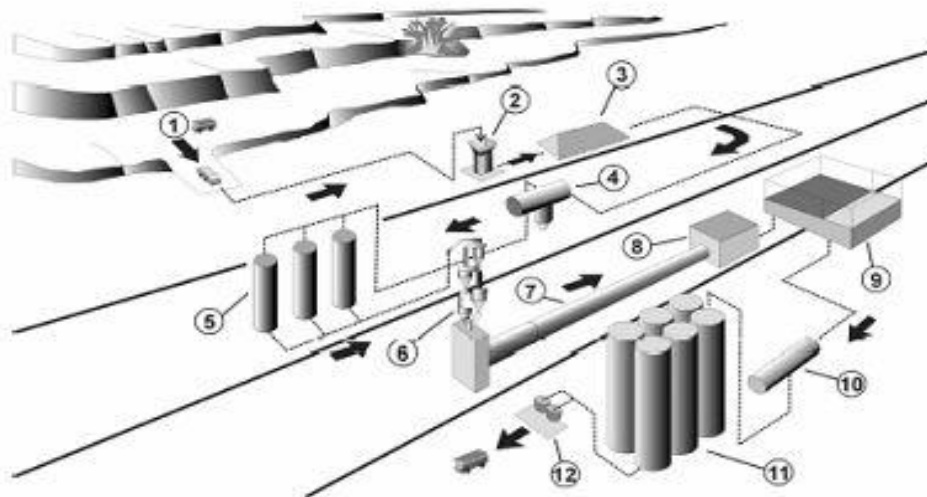


Figura 2.2 - Esquema geral do processo de fabrico de cimento, Adaptado de [19].

## **FASES DE PRODUÇÃO DE CIMENTO**

### I. Extração da matéria-prima e britagem

As principais matérias-primas necessárias à produção de cimento são o calcário e a argila [20] em quantidades aproximadas de 75% e 25% respectivamente. Como a matéria-prima predominante é o calcário, as fábricas de cimento situam-se, normalmente, junto de uma formação calcária [20].

A extração da pedra é feita em pedreiras a céu aberto com recurso a meios mecânicos ou explosivos (passo 1 da Figura 2.2). Após este processo a matéria-prima encontra-se em blocos de grande dimensão sendo necessário a redução do seu tamanho até obtenção de uma granulometria adequada através de britadores (passo 2 da Figura 2.2) [21].

Verifica-se assim nesta fase, um grande consumo de recursos não renováveis (calcário e argila) sendo que, o processo de produção requer aproximadamente 1,7 toneladas de matéria-prima por cada tonelada de cimento produzido [22]. Por outro lado, existe ainda a destruição paisagística criada pela exploração a céu aberto de grandes áreas.

### II. Moagem de cru

Após a extração das matérias-primas estas são doseadas tendo em consideração o produto final a obter, sendo eventualmente necessário a adição de corretivos como areias cinzas de pirite, calcário entre outros (passo 3 da Figura 2.2). De seguida, as matérias-primas são transportadas para moinhos onde se dá o processo de secagem e moagem de forma a obter um pó muito fino designado de cru (passo 4 da Figura 2.2). Posteriormente é feita a homogeneização e armazenamento em silos (passo 5 da Figura 2.2) [21, 23].

### III. Cozedura

O “cru” é colocado num forno cilíndrico rotativo com a temperatura elevada dá-se a cozedura das matérias-primas que reagem entre si transformando-se em silicatos e aluminatos de cálcio, que se designa correntemente de clínquer (passo 6 e 7 da Figura 2.2). Para que se desenvolva este processo de “cozedura” é necessário atingir temperaturas na ordem do 1450°C [20, 21] desta forma é inevitável recorrer à queima de combustíveis como o carvão, gás natural, petróleo e outros combustíveis secundários.

Após conclusão do processo de formação do clínquer inicia-se o arrefecimento rápido do mesmo, este arrefecimento tem importância para o produto final no que se refere à composição mineralógica (passo 8 da Figura 2.2). Por outro lado, o rápido arrefecimento também contribui para a recuperação parcial da energia térmica [20, 21, 23].

O Quadro 2.1 ilustra as percentagens dos compostos principais do clínquer Portland que normalmente existe no cimento Portland.

**Quadro 2.1** - Compostos principais do clínquer Portland, Adaptado de [7, 24].

Nome do composto	Material na forma pura	Composição	Abreviatura	Percentagem
Silicato tricálcico	Alite	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	20% a 80%
Silicato bicálcico	Belite	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	10% a 55%
Aluminato tricálcico	Celite	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	0% a 15%
Aluminoferato tetracálcico	Felite	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	5% a 15%

O processo necessário à obtenção do clínquer é considerado uma grande fonte de poluição: i) consumo de combustíveis fósseis – carvão, gás natural – para a produção de energia térmica; ii) consumo de grandes quantidades de energia elétrica, nesta em todas as outras fases; iii) libertação de GEE para a atmosfera, nomeadamente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) – originados na queima de combustível e pela descarbonatação calcária. Como já referido anteriormente, cerca de uma tonelada de  $\text{CO}_2$  são emitidos para a atmosfera, por cada tonelada de cimento produzida [1].

#### IV. Moagem do cimento

O cimento é o resultado do processo de moagem fina do clínquer com gesso (3-5%) que tem como objectivo regular o tempo de presa (corresponde ao passo 9 da Figura 2.2) [20, 21, 23]. Nesta fase, dependendo do tipo de cimento que se pretende obter podem ainda ser incorporadas na mistura adições como é o caso de cinzas volantes, pozolanas naturais, escórias de alto-forno e calcário. Estas adições podem ser consideradas constituintes principais do cimento à luz da norma 197-1 [25] caso se apresentem em quantidades superiores a 5% da massa total e cumpram os requisitos explicitados na referida norma (Subcapítulo 2.3). É nesta fase que o presente trabalho se insere, este tem como objectivo averiguar a viabilidade de substituição parcial de cimento em quantidades de 5 -15% por um resíduo (ver Subcapítulo 2.3).

## V. Embalagem e expedição

Após a produção, o cimento pode ser embalado, onde é depois depositado em paletes ou pacotes plastificados. Este pode também ser expedido na forma de granel, e neste caso é transferido para silos de armazenamento (corresponde ao passo 11 e 12 da Figura 2.2).

O seu transporte pode ser feito das mais variadas formas, cisternas para transporte rodoviário, cisternas- camiões ou navios, de acordo com as necessidades do cliente.

Apesar da grande necessidade deste material (cimento), os impactos ambientais inerentes à sua produção são relevantes como se explicou anteriormente. Desta forma, o presente estudo tem como objetivo contribuir para a atenuação destes impactos através da criação de novos materiais à base de cimento. Na subsecção seguinte apresentam-se as possíveis medidas de mitigação inerentes à produção de cimento com substituição de clínquer por outro material.

### 2.2.1.2 Medidas de mitigação do impacto ambiental inerente à produção de cimento

Como mencionado anteriormente, o processo de fabrico de cimento implica não só a utilização de grandes quantidades de matérias não renováveis como também produz gases que contribuem para o efeito de estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ ) [26], no entanto, o seu consumo é uma realidade passada, presente e futura.

As quantidades de cimento produzidas à escala mundial são muito significativas – estima-se que em 2050 a sua produção seja de 4.38 Gt (Figura 2.3) – pelo que globalmente a indústria do cimento contribui em cerca de 5% do  $\text{CO}_2$  antropogénico produzido [1].

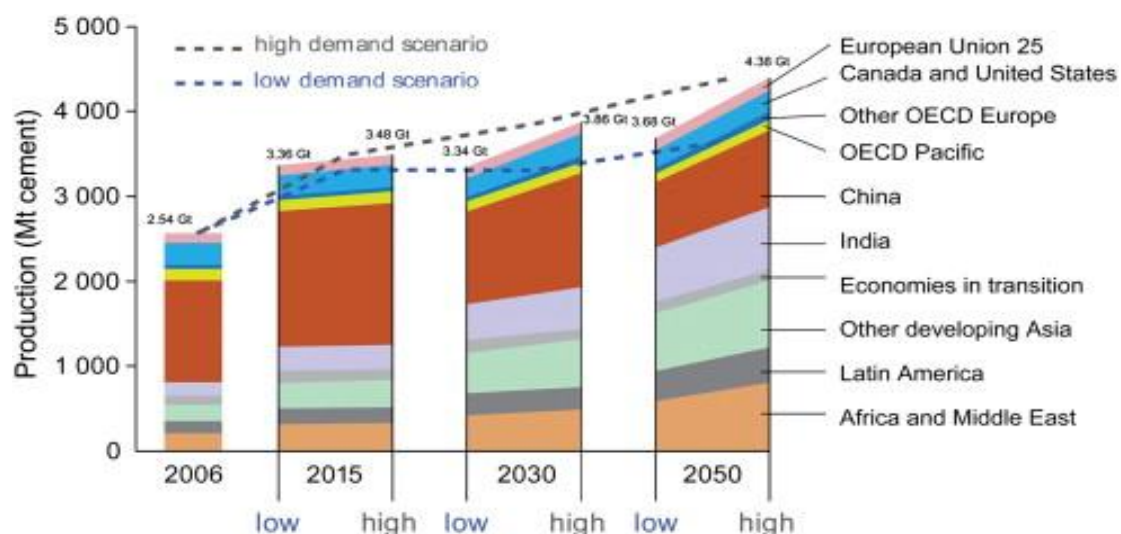


Figura 2.3- Produção global de cimento, Adaptado de [27].

Ultrapassar as alterações climáticas é assim um objectivo a longo prazo, no entanto não se pode por em causa o crescimento tanto dos países desenvolvidos como os países em desenvolvimento. A indústria do cimento, apesar de ser uma das indústrias que origina um dos maiores impactos ambientais, reconhece os seus pontos fracos e tem tomado medidas de consciencialização e mitigação dos seus problemas.

Neste sentido, os produtores de cimento em conjunto com o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) desenvolveram um plano que designaram de “Cement Roadmap 2009” no qual identificaram e se comprometeram à implementação de quatro medidas principais, que têm como principal objetivo a diminuição da quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera provenientes dos processos de fabrico de cimento [2, 28, 29, 30]. Uma dessas medidas – que designaram alavancas – consiste na tentativa da redução de razão clínquer/cimento [28], que na prática corresponde à substituição parcial do clínquer por outros materiais (Subsecção 2.4), resultando daí menores emissões de CO<sub>2</sub>, bem como menores consumos de matérias-primas e de energia necessária à produção de cimento.

A grande maioria dos resíduos utilizados como substitutos parciais do cimento são subprodutos industriais que se não forem utilizados irão ser acumulados em depósitos como aterros, o que inevitavelmente acarretará riscos de poluição dos solos, da água, do ar e até mesmo a chamada poluição paisagística.

Além disso, a utilização destes subprodutos possibilita ainda outros benefícios ambientais dos quais se destacam:

- I. Eliminação dos custos associados à deposição do resíduo no aterro;
- II. Transformação de um resíduo num produto com potencialidade económica;
- III. Redução da energia durante a produção do clínquer;
- IV. Diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> inerentes à produção e cimento;
- V. Conservação dos recursos naturais ao nível das matérias-primas não renováveis necessárias ao fabrico do cimento.

Adicionalmente, além das vantagens que se constatac acima, a utilização destes resíduos como substitutos parciais do cimento Portland pode ainda proporcionar melhores resultados a nível de desempenho e de durabilidade, comparativamente com o cimento Portland de referência [7, 31, 8, 10, 9].

## 2.3 CIMENTOS CORRENTES

O presente estudo pretende avaliar a possibilidade de produzir cimentos com substituição parcial de clínquer por um resíduo (subsecção 2.2.1.2), com a finalidade de permitir a produção de cimentos correntes – cimentos possíveis de ser comercializados na união europeia.

Os cimentos habitualmente comercializados na união europeia estão definidos na norma NP EN 197-1 com a Designação de “cimentos correntes” (abreviadamente, CEM) [25]. Esta norma especifica 27 produtos da série dos cimentos correntes agrupados em 5 tipos principais (Anexo A.1).

A Figura 2.4 ilustra os cinco principais tipos de cimento existentes na norma NP EN 197-1 [25]:

CEM I	•Cimento Portland
CEM II	•Cimento Portland Composto
CEM III	•Cimento de alto forno
CEM IV	•Cimento Pozolânico
CEM V	•Cimento Composto

**Figura 2.4** - Principais tipos de cimento (CEM).

Como foi referido na Subsecção 2.2.1.1, a produção de cimento origina emissões de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Dos cinco tipos de cimento apresentados na Figura 2.4, somente o cimento Portland é maioritariamente constituído por clínquer (95 – 100%) (ver Anexo A.1), todos os outros cimentos são compostos não só por clínquer como também por diversos materiais que formam um ligante hidráulico capaz de ser comercializável – isto é, que apresenta os requisitos apresentados pela norma NP EN 197-1 [25].

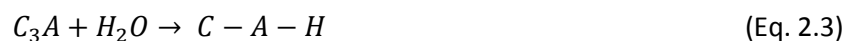
Tendo presente o exposto anteriormente, este estudo ambiciona contribuir para a apreciação da viabilidade de se vir a produzir no futuro cimentos correntes do tipo II com incorporação de um material para além dos já previstos pela norma 197-1 [25]. Em concreto, pretende-se avaliar a possibilidade de incorporar o catalisador exausto de FCC e analisar a influência da dimensão das suas partículas nas propriedades dos produtos finais a preparar.

### 2.3.1 Hidratação do cimento

O cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa e endurece, conservando a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água [25]. É na sequência deste processo de hidratação que o cimento se torna um material interessante enquanto material de construção.

A série de reações químicas – desencadeadas na sequência do contacto da água com as partículas de cimento que provocam alterações químicas, físicas e mecânicas na matriz do cimento – ocorrem a diferentes velocidades, influenciando-se mutuamente [32]. Por este motivo, o processo de hidratação do cimento é complexo, existindo várias teorias sobre os fenómenos envolvidos neste processo [20, 32, 33].

As principais reações de hidratação do cimento correspondem às reações de hidratação dos constituintes do clínquer (Quadro 2.1), e encontram-se sistematizadas de forma simplificada abaixo (a simplificação advém do facto de na prática estes compostos não se encontrarem na forma pura) [34]:



Nos quais,  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4A$  são os compostos constituintes do cimento (Quadro 2.1), o C-S-H são silicatos de cálcio hidratados, CH é o hidróxido de cálcio (portlantite), e os C-A/F-H são aluminatos (aluminoferratos) de cálcio hidratados.

Os aluminatos de cálcio,  $C_3A$ , são os compostos que hidratam com maior rapidez dando origem a fenómenos de falsa presa que dificultam a prossecução das reações de hidratação dos outros compostos. Por este motivo, adiciona-se gesso (3-5%, em massa) na fase da moagem do clínquer (Subsecção 2.2.1.1) com o objectivo de se comportar como retardador de presa [34].

Os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) representam a maior parte das fases sólidas presentes nas pastas de cimento endurecidas e são os principais responsáveis pelas suas propriedades ligantes e pela elevada resistência mecânica que estes materiais desenvolvem. Por outro lado,

o CH é responsável pela elevada basicidade que os compostos à base de cimento adquirem e são essenciais para a ocorrência de reações pozolânicas – de interesse para o presente estudo e que se encontram explicadas no Subcapítulo seguinte.

## 2.4 SUBSTITUTOS PARCIAIS DO CIMENTO

Como já referido anteriormente, uma das alavancas estabelecida para a mitigação do impacto ambiental associado à produção do cimento é a substituição do clínquer por outros materiais (Subsecção 2.2.1.2).

No caso de o cimento ser parcialmente substituído por outros materiais – que podem ser quimicamente inertes ou não – podem ocorrer reações químicas adicionais durante a fase de hidratação do cimento, que estão referidas na Secção 2.3.1.

Os substitutos parciais do clínquer podem classificar-se quanto à sua reactividade química de acordo com o esquema que se apresenta na Figura 2.5.

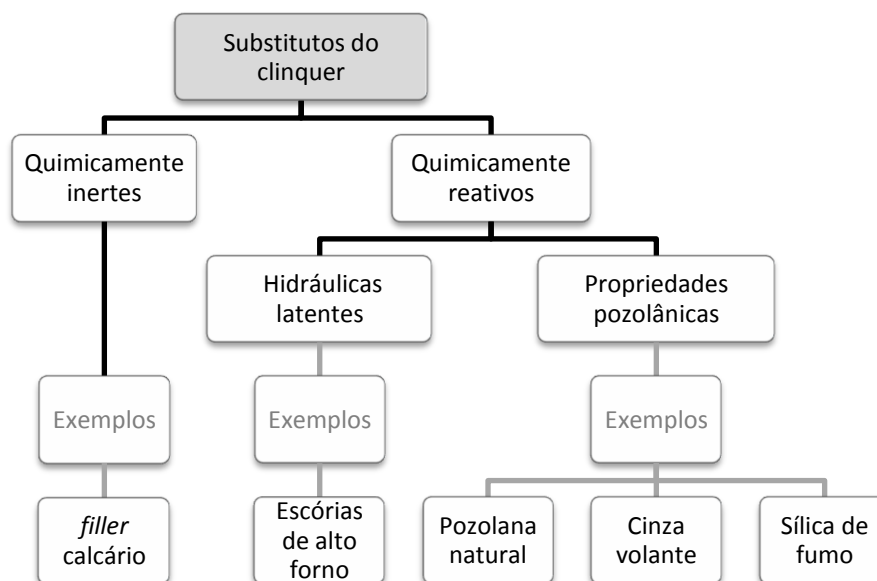


Figura 2.5 - Classificação dos substitutos do clínquer de acordo com a sua reactividade química.

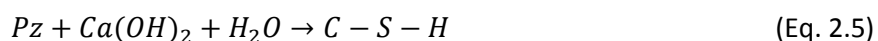
Atribui-se o nome de substitutos quimicamente inertes àqueles cujo seu envolvimento nas reações químicas pode ser desprezado. Neste caso, a substituição parcial de clínquer por estes materiais conduz tipicamente à diminuição da resistência final dos materiais à base de cimento, devido a um efeito que se designa correntemente de diluição [35]. Porém, as consequências desta substituição podem ser minimizadas pelo preenchimento da curva

granulométrica dos sólidos presentes no material à base de cimento por outros materiais que se designam normalmente de *filleres*.

O efeito de *filler* é mais significativo quanto menor for a dimensão das partículas de substituto inerte incorporado [20, 6, 35]. Outros benefícios associados a este efeito são a redução da fissuração e a diminuição da permeabilidade que estão normalmente associados ao aumento da durabilidade [36]. Para além disto, a sua utilização pode permitir a redução da quantidade de água adicionada, quando preparado nas devidas condições [20]. O calcário (material proveniente das rochas calcárias) é o *filler* mais vulgarmente utilizado.

Os substitutos do clínquer com propriedades hidráulicas latentes hidratam numa extensão significativa na presença de um ativador alcalino adequado conduzindo à formação adicional de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (composto quimicamente semelhante aos compostos hidratados do cimento). O exemplo mais comum de materiais hidráulicos latentes são as escórias de alto-forno – um subproduto industrial – que resulta do arrefecimento rápido de uma escória fundida, como a obtida da fusão do minério de ferro, num alto-forno [25].

Os materiais com propriedades pozolânicas são constituídos essencialmente por sílica ou aluminossilicatos que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, hidratam na presença de hidróxido de cálcio (CH) – um dos compostos resultantes da hidratação do clínquer (Equação 2.1 e 2.2) – formando-se como produtos da reação de silicatos de cálcio hidratados, C-S-H, compostos da mesma natureza química que os que conferem resistência aos cimento hidratado (Secção 2.3.1) [20]. A Equação 2.5 representa a equação genérica de um material pozolânico, em que *Pz* é o material pozolânico:



Os materiais pozolânicos podem ser de origem natural (provenientes de erupções vulcânicas ou de argilas cozidas naturalmente pela lava incandescente) [37] ou de origem artificial como é o caso das cinzas volantes e da sílica de fumo (subprodutos industriais) [7, 20, 38, 37].

Os substitutos do clínquer cuja utilização já está atualmente prevista na norma NP EN 197-1 [25], foram referidos anteriormente (Subcapítulo 2.3) e se cumprirem os requisitos impostos por esta norma podem ser incorporados em cimentos para comercialização no mercado europeu. Por forma a promover o desenvolvimento de uma indústria sustentável e ecológica, continuam a realizar-se estudos que conduzam à identificação de outros substitutos possíveis como é o caso das cinzas casca de arroz [39], os resíduos da produção de tijolo cerâmico e

metacaulinita [40] , resíduos da produção de vidro [41], cinzas de lamas da estação de tratamento de água [42], entre outros [43].

## 2.4.1 Catalisador exausto da indústria petroquímica

---

### 2.4.1.1 Origem

O petróleo é uma fonte de energia não renovável, de origem fóssil sendo a matéria-prima da indústria petrolífera e petroquímica. No seu estado bruto, ou seja, a forma como é extraído do solo, o petróleo é uma mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos na qual predominam os hidrocarbonetos constituídos por moléculas de grandes dimensões [45].

A refinação do petróleo consiste, essencialmente, na quebra (*cracking*) e separação das moléculas de hidrocarbonetos em distintas frações de hidrocarbonetos mais leves, tirando partido das suas diferentes densidades e volatilidades [46]. Deste processo resultam diversos produtos com aplicação – gasóleo, óleo, nafta, querosene, entre outros [47] –, uma vez que no seu estado bruto o petróleo, não apresenta qualquer tipo de utilização. [26, 46].

O processo de *cracking* catalítico em meio fluidificado surgiu como forma de satisfazer as necessidades humanas de forma a corrigir o défice que as refinarias de petróleo apresentavam na produção de produtos mais consumidos no mercado. Assim, este processo veio otimizar o rendimento do processo de refinação convertendo os hidrocarbonetos de cadeias longas – óleos combustíveis – em produtos mais leves – gasóleo e gasolina – uma vez que, o consumo destes produtos é muito superior [26].

O processo de *cracking* catalítico em leito fluidificado (cuja designação em inglês é *Fluid Catalytic Cracking* (FCC) pelo que surge denominado frequentemente mesmo em português por “unidades de FCC”) é realizado na presença de um catalisador que aumenta a eficiência da reação química [48]. Este catalisador apresenta-se sob a forma de microesferas com um tamanho médio de partícula reduzidas na ordem dos 60 µm.

Os principais constituintes deste catalisador são: i) um zeólito Y (5-40%) constituído por aluminossilicatos; ii) uma matriz que fornece uma estrutura porosa adequada à difusão dos hidrocarbonetos, sendo que parte desta é constituída por uma fração ativa constituída por alumina e outra fração inerte constituída por uma argila – caulino; iii) um ligante que estabelece a ligação entre os diferentes elementos [49, 26].

Durante o processo de *cracking* catalítico, a atividade química associada à cisão dos hidrocarbonetos produz um resíduo de alto teor de carbono – coque – que se deposita sobre a superfície do catalisador, diminuindo a sua eficiência [26, 6]. De modo que ocorra a regeneração do catalisador a temperatura é aumentada para valores entre os 680 – 750°C. Contudo, esta regeneração não ocorre em todo o catalisador presente no processo e o catalisador exausto é removido do processo e substituído por catalisador “fresco” (que ainda não foi utilizado). O catalisador exausto removido do processo de *cracking* catalítico é, atualmente, enviado para aterros sanitários.

O catalisador de FCC é essencialmente um aluminossilicato que apresenta potencialmente propriedades pozolânicas (Subcapítulo 2.4), que já foram confirmadas em trabalhos anteriores [3, 4, 7, 8, 5, 10, 9] (Subsecção 2.4.1.2). Por este motivo, a indústria do cimento é considerada um dos sectores-chave no reaproveitamento deste subproduto industrial, criando uma solução ambientalmente preferível ao seu destino atual (pela razões expostas na Subsecção 2.2.1.2) [50].

Este resíduo cumpre com os requisitos ambientais necessários para ser classificado como não perigoso [51, 52].

Em 1990, foram utilizados cerca de 350 000 toneladas de catalisadores de FCC, dos quais 180000 toneladas nos EUA, e cerca de 60 000 toneladas na Europa Ocidental [53]. Atualmente, as refinarias de petróleo usam aproximadamente 500 000 toneladas do catalisador de FCC, dos quais 20% são usados em refinarias europeias [50, 54]. A Galp Energia é proprietária de uma refinaria em Sines, que iniciou a sua laboração em 1978 [55], sendo que atualmente apresenta uma unidade de FCC. Desta forma, também em Portugal são geradas cerca de 60000 toneladas por ano do resíduo catalítico de FCC [54]. Assim, considera-se vantajoso o seu reaproveitamento noutras áreas.

#### **2.4.1.2 Propriedades pozolânicas do catalisador exausto de FCC**

As propriedades do catalisador exausto de FCC, dependem da refinaria onde é produzido. Desta forma, é necessário avaliar o seu comportamento individualmente, servindo os testes feitos por outros autores, com resíduos de refinarias diferentes, como forma de comparar tendências e não valores [56].

Estudos já realizados confirmaram que o catalisador exausto de FCC tem propriedades pozolânicas e portanto é promissor para ser utilizado como substituto parcial do cimento [57,

51, 5, 58, 13, 4, 59, 60], incluindo o catalisador exausto gerado pela refinaria da GALP em Sines [7, 10, 9, 8].

A trabalhabilidade da argamassa pode ser influenciada pela incorporação de resíduo de FCC [3, 52]. Verifica-se que, quando se substitui parcialmente cimento por este resíduo, ocorre, tipicamente, uma perda de trabalhabilidade da argamassa devido à elevada afinidade deste resíduo com a água. Neste sentido é necessário a incorporação de mais água ou utilização de um superplastificante [61] durante a produção de argamassa de modo a colmatar esta perda.

A incorporação de resíduo de FCC como substituto parcial de cimento pode traduzir-se tanto no aumento como na diminuição da resistência à compressão quando comparadas com as argamassas de referência. Este facto depende não só da percentagem de substituição efectuada como da origem do resíduo. Desta forma, estudos concluem que quando o cimento é substituído parcialmente por 5% de resíduo, existem ganhos de resistência logo após as 24h de hidratação, por outro lado, tal não se verifica quando a substituição é feita entre 20-30% visto que ocorre uma perda de resistência comparativamente com as argamassas de referência [26, 6, 59]. Assim, da observação de vários estudos chegou-se à conclusão que a substituição parcial do cimento por resíduo FCC é benéfica, para pequenas adições de 5-15% de substituição, pois para adições mais elevadas conduz a uma diminuição do calor de hidratação [8, 7, 44, 6, 59].

Também se verificou que a ação pozolânica do resíduo é favorecida quando este apresenta uma maior superfície específica e quando a dimensão da partícula é mais próxima da dimensão das partículas do cimento [6]. Relativamente à dimensão da partícula de FCC, todos os estudos feitos até ao momento comprovaram que os resíduos com menor dimensão de partícula apresentam maior atividade pozolânica [6, 44, 62, 52, 14]. Quando comparados os resultados obtidos para resíduos com dimensões de partícula maiores e menores, conclui-se que se obtêm melhores valores de resistência quando a dimensão da partícula é menor [52, 8, 63, 64].

A presente dissertação tem como principal finalidade avaliar a potencial de utilização de resíduo de FCC quando utilizado como substituto parcial do cimento. Tendo em conta o descrito ao longo deste capítulo, a sua utilização é importante tanto a nível ambiental como económico. A viabilidade do uso do catalisador exausto da indústria petroquímica para a produção de materiais à base de cimento já foi comprovada por diversos autores [7, 8, 44, 9, 10] daí o interesse em prosseguir estudos de forma a obter uma informação mais aprofundada

das alterações provocadas por este resíduo nas argamassas de cimento, nomeadamente verificar o efeito da moagem deste nas propriedades das argamassas.

# 3

## Descrição do Trabalho Experimental

*“O êxito começa no momento exato em que o Homem  
decide o que quer e começa a trabalhar para o conseguir.”*

Roberto Shinyashiki

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como já referido no capítulo anterior, a presente dissertação tem como principal objectivo avaliar o efeito da dimensão das partículas de catalisador exausto de FCC nas propriedades das argamassas de cimento em que é incorporado. Na prossecução deste objectivo, adotaram-se duas abordagens metodológicas diferentes na preparação das argamassas, considerando-se que cada uma das metodologias seguida originou a uma “série” distinta de argamassas (Quadro 3.1):

- Numa das séries adicionou-se sempre a mesma quantidade de SP em todas as formulações (o que se traduz em argamassas com diferentes valores de consistência no estado fresco);
- Na outra série adicionou-se quantidades variáveis de SP de forma a assegurar a preparação de argamassas com consistência constante (Secção 3.3.1.).

A fundamentação que conduziu à preparação destas duas séries de argamassas reside no facto das propriedades das argamassas - particularmente, a resistência mecânica no estado sólido - poderem ser afetadas: por um lado, pelo teor de incorporação de resíduo de FCC [8, 7] que condiciona a atividade pozolânica e o efeito de *filler* do resíduo em cada argamassa especificamente; e por outro lado, pela alteração da trabalhabilidade nas argamassas imposta pela incorporação de resíduo de FCC (devida à elevada área superficial específica com afinidade para a água) que condiciona a capacidade de compactação das argamassas. Por estes motivos, pretendeu-se avaliar em que medida a imposição de consistência constante nas argamassas – em concomitância com a alteração de teor de incorporação de resíduo – conduz a alterações significativas nas propriedades das argamassas relativamente aquelas em que não existe essa preocupação.

Assim, a campanha experimental incluiu a preparação argamassas de cimento nas quais se variaram sistematicamente: (i) o valor da fração mássica de catalisador de FCC exausto incorporado, de 5 a 15% (em massa) com um incremento de 5% e (ii) a distribuição do tamanho das partículas do catalisador exausto de FCC utilizado. O resíduo de FCC utilizado foi produzido na refinaria de Sines da Petrogal (Secção 2.4.3), e por forma a obter três distribuições de tamanho de partícula diferentes (Secção 3.2.2), este catalisador exausto foi submetido a dois processos de moagem nos laboratórios da CIMPOR localizados no Prior Velho.

A designação adotada para as 19 argamassas preparadas apresenta-se no Quadro 3.1. Esta denominação pretende evidenciar (i) a fração mássica de cimento substituído por resíduo; (ii) a distribuição de tamanho de partícula de FCC usado e, ainda (iii) a “série” a que a argamassa pertence ou seja, aquela cuja adição de SP se manteve constante ou aquela em que se variou o teor de SP de forma a garantir a consistência das argamassas, no estado fresco, constante. Elucida-se que, por exemplo, a argamassa designada por “5F\_M1\_C” corresponde a uma argamassa que contém na sua constituição 95% (em massa) de cimento e 5% de resíduo de FCC (5F), moído uma vez (M1) correspondente à série de argamassas com consistência constante (C). Note-se ainda que todas as argamassas, à exceção da 100C, contêm superplastificante (SikaPlast 898).

**Quadro 3.1** - Designação adotada para as argamassas efetuadas em função da composição.

Série	Argamassas	Ligante (%)		SP			
		Cimento CEM I 42,5R	Catalisador Exausto Petroquímico -FCC	(g)	(%)		
Consistência constante	Referência	100C	100	0	0	0	
	Não Moído	5F_C	95	5	1,8	0,13	
		10F_C	90	10	3	0,22	
		15F_C**	85	15	5,4	0,40	
	Moído 1x	5F_M1_C	95	5	1,5	0,11	
		10F_M1_C	90	10	2,7	0,20	
		15F_M1_C	85	15	3,9	0,29	
	Moído 2x	5F_M2_C	95	5	1,2	0,09	
		10F_M2_C	90	10	2,1	0,16	
		15F_M2_C	85	15	3,3	0,24	
	Teor SP* constante	Referência	100C - SP	100	0		
		Não Moído	5F_SP	95	5		
10F_SP			90	10			
15F_SP**			85	15			
Moído 1x		5F_M1_SP	95	5	5,4	0,4	
		10F_M1_SP	90	10			
		15F_M1_SP	85	15			
Moído 2x		5F_M2_SP	95	5			
		10F_M2_SP	90	10			
		15F_M2_SP	85	15			

\* Superplastificante

15F\_C\*\* e 15F\_SP\*\* correspondem à mesma composição de argamassa (como explicado no subcapítulo 4.1). Contudo, como os resultados obtidos com esta argamassa podem ser comparados com os resultados das outras argamassas de cada uma das “séries” preparadas, assumiu-se designações distintas quando se pretendeu comparar com cada uma das séries

As argamassas preparadas foram estudadas no estado fresco e endurecido, para diferentes idades<sup>1</sup>. No Quadro 3.2 apresentam-se os ensaios efetuados, tanto no estado fresco como no estado endurecido, as normas seguidas para a sua realização, as idades a que as argamassas foram estudadas e, ainda, as subsecções desta dissertação em que os ensaios são descritos.

<sup>1</sup> Por idade de um provete entende-se o tempo de contacto desde o instante em que se adiciona o ligante à água, na preparação da argamassa, até ao momento do ensaio.

**Quadro 3.2** - Ensaios realizados para caracterização das argamassas, as normas seguidas para a sua realização bem como, os subcapítulos desta dissertação em que os ensaios são descritos.

Ensaios		Norma do ensaio	Idade do ensaio	Subsecção
Estado fresco	Consistência por espalhamento	EN 1015-3	0 Horas	3.3.5.1
	Massa volúmica	EN 1015-6		3.3.5.2
	Teor de ar	EN 1015-7		3.3.5.3
Estado Endurecido	Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas	NP EN 12504-4	2, 7, 28, 56, 90 Dias	3.3.6.1
	Resistência à compressão e flexão	NP EN 196-1		3.3.6.2
	Arrancamento por tracção – aderência	EN 1015-12	28 Dias	3.3.6.3
	Absorção de água por capilaridade	EN 1015-18		3.3.6.4

O trabalho experimental foi desenvolvido entre os meses de Março e Julho de 2012 no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), mais concretamente no Laboratório de Materiais de Construção existente no Departamento de Engenharia Civil, com exceção do ensaio de arrancamento por tração – Aderência, que se efetivou nos laboratórios da CIARGA – Argamassas Secas S.A. A campanha experimental, envolveu a preparação de 21 provetes para cada composição de argamassa em estudo o que conduz a um total 399 provetes produzidos, para os ensaios no estado endurecido, e ainda, 24 provetes como camada de revestimento em tijolo para os ensaios de aderência.

O presente capítulo expõem a caracterização do material e constituintes das argamassas (Subcapítulo 3.2), os procedimentos de ensaio adotados no estado fresco (Secção 3.3.5) e endurecido (Secção 3.3.6) para a caracterização das argamassas em estudo.

## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 Cimento

O cimento adotado para o desenvolvimento da campanha experimental foi o cimento Portland da classe de resistência 42,5 com elevada resistência nos primeiros dias (CEM I 42,5R), fornecido pelo grupo CIMPOR, mais propriamente pela fábrica de Alhandra, tendo-se utilizado para a campanha sempre o mesmo lote.

De acordo com a ficha técnica do fabricante (Anexo C.1) e segundo a NP 197-1 [25] este cimento apresenta na sua constituição uma percentagem de clínquer que varia entre 95 e 100% e outros constituintes adicionais com uma percentagem de 0 a 5% (Anexo A.1).

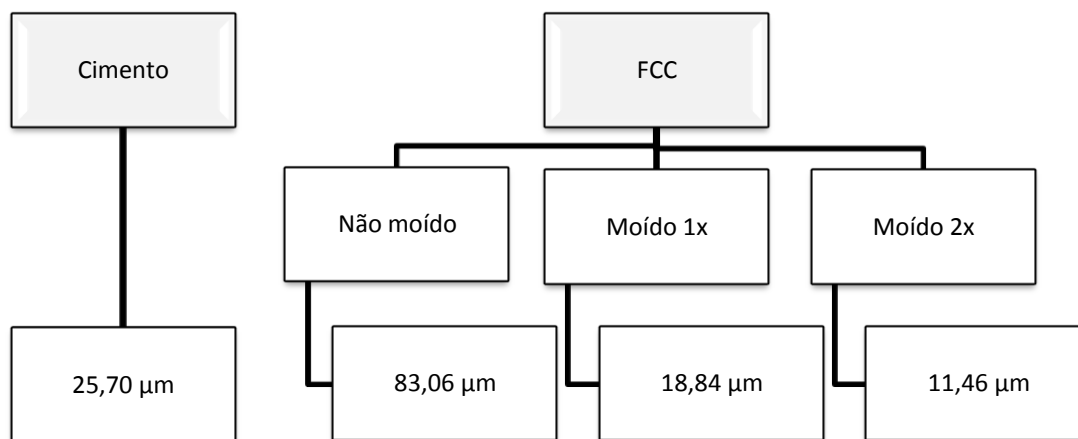
O cimento foi acondicionado em bidões com fecho estanque até à sua utilização, por forma de evitar a hidratação prematura.



**Figura 3.1** - a) Cuidados no acondicionamento do cimento; b) Características: Tipo de cimento (CEM I 42,5 R), data e silo a que corresponde; c) Cimento Portland CEM I 42,5R utilizado na realização da campanha experimental.

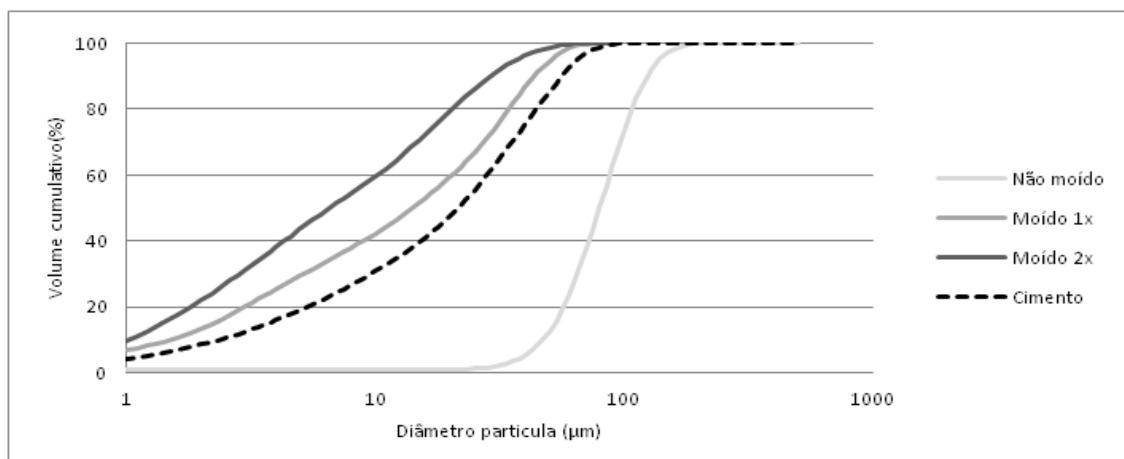
### 3.2.2 FCC

O catalisador exausto da unidade de *cracking* catalítico em leito fluidificado (FCC) foi gerado na refinaria de Sines e fornecido pela Petrogal. Para a realização da campanha experimental moeu-se este resíduo 1x e 2x - nos laboratórios da CIMPOR localizados no Prior Velho – de forma a se obterem três distribuições médias de partícula para o resíduo da indústria petroquímica. A Figura 3.2 apresenta as dimensões médias das partículas do cimento e do catalisador exausto da indústria petroquímica usado neste trabalho, antes e depois de moído.



**Figura 3.2** - Dimensões médias das partículas de cimento e das diferentes amostras de FCC utilizadas

Na Figura 3.3 representam-se as distribuições de tamanho de partícula do cimento e das diferentes amostras de resíduo de FCC, obtidas por difração de laser (CILAS 1064 Liquid).



**Figura 3.3** - Análise granulométrica por difração de raios laser efetuada sobre os ligantes (cimento CEM I 42,5 R e resíduo de FCC).

Da análise da representação gráfica apresentada na Figura 3.3 constata-se que a dimensão das partículas do resíduo não moído é superior à dimensão das partículas de cimento e que, tanto as partículas do resíduo de FCC moído 1x como as do moído 2x são inferiores às do cimento.

Relativamente ao armazenamento do resíduo, houve sempre a preocupação de o manter em local seco e protegido de eventuais humidades.

### 3.2.3 Agregado

A areia utilizada no presente estudo foi areia certificada pela AFNOR (Associação de normalização francesa) e produzida pela empresa *Société Nouvelle du Littoral* (SNL) (Anexo C.2). A utilização deste tipo de areia está prevista na NP EN 196-1 [65] que consiste numa areia natural, siliciosa de grão arredondado e com uma percentagem de teor de sílica igual ou superior a 98% (Anexo C.2). A composição granulométrica desta areia apresenta-se no Quadro 3.3.

**Quadro 3.3** - Composição granulométrica da areia de referência CEN.

Malha do peneiro (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
% Acumulada de material retido	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

### 3.2.4 Água

---

Apesar de a norma NP EN 196-1 [65] permitir o uso de água da rede pública na produção da argamassa, foi utilizada, no presente estudo, água destilada de forma a garantir que esta não constituía uma variável neste estudo.

A quantidade de água utilizada durante a amassadura foi fixada para uma relação mássica água/ligante de 0,5% (podendo o ligante ser apenas cimento, ou cimento e resíduo de FCC – Quadro 3.1).

### 3.2.5 Superplastificante

---

O superplastificante (SP) utilizado para a realização da campanha foi o SikaPlast 898 (cuja ficha técnica do fabricante se encontra no Anexo C.3), fornecido pela empresa Sika.

A utilização de superplastificante deveu-se sobretudo à necessidade de induzir trabalhabilidade, uma vez que o resíduo incorporado absorve quantidades significativas de água.

A percentagem mássica de superplastificante utilizada (em relação à massa de ligante) para cada formulação de argamassa está apresentada no Quadro 3.1. A definição da quantidade de superplastificante a adicionar à argamassa encontra-se explicada no subcapítulo 3.1.

## 3.3 MÉTODOS DE ENSAIO

### 3.3.1 Definição da quantidade de superplastificante

---

Como já referido anteriormente (Subcapítulo 3.1), prepararam-se duas “séries” de argamassas com diferentes teores de resíduo de FCC incorporado, com as três distribuições de tamanho de partícula em estudo, que se diferenciam entre si (Quadro 3.1):

- Numa das séries, a razão água/ligante e a quantidade de SP utilizada na preparação das argamassas mantiveram-se contantes;
- Na outra série a razão água/ligante manteve-se constante tendo-se variado a quantidade de SP adicionado de forma a garantir que a consistência (trabalhabilidade)

das argamassas se mantivesse constante e igual à da argamassa de referência (100C) preparada de acordo com a norma NP EN 196-1 [65].

As razões que conduziram à adoção destas duas metodologias encontram-se apresentadas no subcapítulo 3.1.

Desta forma, previamente à produção de qualquer argamassa, produziram-se, à priori, ensaios no estado fresco para a argamassa 100C com as quantidades referidas na norma NP EN 196-1 [65] (450 g cimento, 1350 g areia e 225 g água) – que se designa 1 dose. Através da realização do ensaio que permite avaliar a consistência da argamassa, verificou-se que o espalhamento da mesma era de 175 mm. Nesta perspetiva e com o intuito de iniciar a produção das argamassas que constituem a série “consistência constante” elaborou-se um estudo que visou determinar a quantidade de superplastificante necessário a cada argamassa para que esta obtivesse uma trabalhabilidade igual à 100C (175mm ± 5 mm).

Todavia, devido à extensão da campanha experimental apresentada estudou-se a possibilidade de aumentar as quantidades de produção de argamassa referidas na NP EN 196-1 [65] para três vezes mais (1350g cimento, 4050g areia e 675g de água) – que se designa por 3 doses –, conseguindo-se desta forma encher nove provetes para a realização dos ensaios no estado endurecido por cada amassadura (Secção 3.3.6).

No Quadro 3.4 apresentam-se os valores de superplastificante necessários a cada argamassa da série “consistência contante”, isto é, com incorporação de 5, 10 e 15% de resíduo de FCC tal como é rececionado da refinaria – não moído – e moído 1x e 2x de forma a assegurar que estas argamassas têm uma trabalhabilidade igual à argamassa 100C. O referido quadro apresenta os valores de SP necessários adicionar para se preparar a quantidade prevista na norma NP EN 196-1 (1 dose) ou três vezes essa quantidade (3 doses).

**Quadro 3.4** - Quantidades de superplastificante necessários a cada argamassa.

Série	Argamassa	1 Dose		3 Doses		
		SP (g)	dm (mm)	SP (g)	dm (mm)	
Consistência constante	Referência	100C	0	175	0	188
	Não moído	5F_C	0,6	178	1,8	187
		10F_C	1	175	3	188
		15F_C	1,8	178	5,4	189
		5F_M1_C	0,5	176	1,5	189
	Moído 1x	10F_M1_C	0,9	175	2,7	188
		15F_M1_C	1,3	180	3,9	187
		5_M2_C	0,4	175	1,2	190
	Moído 2x	10F_M2_C	0,7	175	2,1	188
		15F_M2_C	1,1	175	3,3	186

Teoricamente, a diminuição da distribuição do tamanho de partícula (DTP) faz com que ocorra um aumento da área superficial específica da partícula [58]. Nesta perspectiva, quanto maior a área superficial específica (ASE) das partículas maior seria a quantidade de água necessária à argamassa [58]. Porém os resultados indicaram que, à medida que se diminui a dimensão da partícula, não ocorre necessariamente o aumento do teor de água para a obtenção de igual trabalhabilidade, chegando-se à conclusão, após análise do Quadro 3.4, que a argamassa 15F\_C foi a que se revelou mais conducente a maior perda de consistência, necessitando assim de uma maior quantidade de superplastificante. Na verdade, considerando-se somente a ASE o que se esperaria obter era um aumento da necessidade de água para obter a trabalhabilidade adequada, no entanto, esta também é influenciada por outros aspetos como a forma das partículas.

### 3.3.2 Preparação da argamassa

O procedimento de formulação das argamassas efetuadas no decorrer da campanha experimental baseou-se nos procedimentos definidos pela norma NP EN 196-1 [65], tendo sido feitas algumas alterações nas quantidades previstas por esta norma, uma vez que esta prevê a preparação de uma dada quantidade de argamassa (que se refere aqui como “uma dose”), e ao longo desta campanha foram formuladas argamassas com quantidades três vezes superiores, que se considerou como sendo “3 doses”.

Da mesma forma, para o procedimento de mistura das argamassas foi utilizado um processo alternativo ao descrito pela mesma norma, uma vez que existe a necessidade de introdução de SP. Assim, os tempos de amassadura, a ordem de introdução dos constituintes bem como as quantidades da argamassa usados, constituem uma adaptação do processo descrito na norma NP EN 196-1 [65] e apresentam-se ilustrados na Figura 3.4. O Quadro 3.5 enumera os materiais necessários na preparação de argamassa.

**Quadro 3.5** -Material e utensílios usados na preparação das argamassas.

Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Misturadora mecânica (PERTA)</li> <li>▪ Balança (0,1g de precisão)</li> <li>▪ Cronómetro</li> <li>▪ 2 Pipetas</li> <li>▪ 3 Copos graduados</li> <li>▪ Raspadeira de borracha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cimento CEM I 42,5R (CIMPOR)</li> <li>▪ Areia CEN</li> <li>▪ Água destilada</li> <li>▪ Catalisador de FCC (Petrogal)<sup>2</sup></li> <li>▪ Superplastificante (SikaPlast 898)</li> </ul>

<sup>2</sup> Exceto argamassas de referência.

Como etapa preliminar à produção da argamassa teve-se o humedecimento de todos os materiais necessários, como sejam o recipiente e pá da misturadora, para que se mantivessem sempre as mesmas condições na formulação das argamassas.

Estabeleceram-se ainda as quantidades dos constituintes da argamassa, numa balança de precisão de 0,1g, com o intuito de todos os componentes se encontrarem disponíveis nas devidas porções aquando o início do processo. De acordo com a NP EN 196-1 [65], cada amassadura para 1 molde (três provetes) deve conter  $450g \pm 2g$  de cimento,  $1350 \pm 5g$  de areia e  $225 \pm 1g$  de água. Tendo em conta a capacidade da misturadora, por cada amassadura produziu-se argamassa com capacidade para preencher três moldes de provetes prismáticos.

Para a produção de argamassa começou por se introduzir na misturadora (Figura 3.4 (a) e (d)) a areia seguindo-se o cimento e por fim o resíduo de FCC (Figura 3.4 (d)). Ligou-se a máquina misturadora a uma velocidade lenta ( $140 \pm 5$  r.p.m) (Figura 3.4 (e)) e passado 1 minuto, mantendo a mesma velocidade adicionou-se à mistura 2/3 da água desejada. Em seguida, passados 2 minutos do tempo inicial adiciona-se a restante água previamente misturada com a quantidade de superplastificante prevista para a argamassa. Deixou-se a misturadora a funcionar, sempre em velocidade lenta durante mais 5 minutos. Ao fim do tempo referido, pára-se o movimento do misturador durante 2 minutos e durante o primeiro minuto, com auxílio da raspadeira de borracha, faz-se uma mistura manual juntando-se o material aderente às paredes e ao fundo do recipiente (Figura 3.4 (f)). No minuto seguinte deixou-se a argamassa num estado de repouso. O misturador foi novamente acionado, num movimento lento durante um período de 1 minuto, dando-se assim por concluído o processo de amassadura (Figura 3.4 (g)).



**Figura 3.4** - Etapas necessárias à preparação de argamassa. a) Misturadora mecânica; b) Constituintes da argamassa; c) Preparação das porções necessárias, antes da realização do ensaio; d) Introdução do agregado na cuba; e) Início do funcionamento da misturadora; f) Raspagem da argamassa aderente às paredes e ao fundo da cuba; g) Finalização do fabrico de argamassa.

### 3.3.3 Preparação dos provetes prismáticos

A preparação dos provetes prismáticos efectuou-se, imediatamente, após a preparação da argamassa e segue o previsto pela norma NP EN 196-1 [65]. Cada amassadura preparada neste trabalho possibilita a execução de 9 provetes prismáticos, com  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  que irão ser submetidos ao ensaio de ultrassons (Subsecção 3.3.6.1), resistência mecânica (Subsecção 3.3.6.2) e absorção de água por capilaridade (Subsecção 3.3.6.4).

Salienta-se que, antes da execução dos provetes, as diferentes argamassas formuladas foram sempre submetidas ao ensaio de consistência de espalhamento (Subsecção 3.3.5.1) com o intuito de assegurar a repetibilidade entre as diferentes amassaduras de cada argamassa formulada nas mesmas condições.

Os materiais e utensílios necessários para a obtenção dos provetes prismáticos estão enumerados no Quadro 3.6.

**Quadro 3.6** - Material e utensílios necessários para obtenção de provetes prismáticos.

Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Compactador (MATEST)</li> <li>▪ Espátulas do compactador</li> <li>▪ Colher</li> <li>▪ 2 Panos</li> <li>▪ Régua metálica</li> <li>▪ Placas de vidro</li> <li>▪ Tolha húmida</li> <li>▪ Martelo de borracha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Óleo de base mineral (Galp)</li> <li>▪ Argamassa formulada</li> </ul>

Na Figura 3.5 apresenta-se a sequência de trabalhos para a elaboração de provetes prismáticos.

Antecipadamente ao enchimento do molde, este é devidamente oleado de forma a facilitar a posterior desmoldagem (Figura 3.5 (b)). De seguida, procedeu-se ao seu posicionamento no compactador mecânico (Figura 3.5 (c)), tendo em consideração a colocação da alonga (acréscimo de molde). O seu preenchimento na totalidade ocorre em duas fases.

Primeiramente preencheram-se os três provetes prismáticos até cerca de metade da altura do molde, recorrendo-se de seguida a uma espátula com dimensões específicas para retirar a argamassa inserida em excesso (Figura 3.5 (d) e (e)). Seguiu-se a compactação da mesma através de 60 pancadas com o auxílio de um compactador mecânico.

A segunda fase consistiu em completar, com argamassa, a restante metade do molde, passando uma espátula com dimensões mais reduzidas, que a anteriormente referida, tendo-se efetuado uma nova compactação mecânica, igualmente de 60 pancadas. Teve-se em consideração a colocação, durante a compactação, de um pano húmido, sobre o recipiente da argamassa, de forma a evitar a evaporação da água contida na argamassa.

Por fim, retirou-se o provete do compactador mecânico e com recurso a uma régua metálica, nivelou-se a superfície, ao longo da maior dimensão do provete, com o intuito de extrair a argamassa excedente (Figura 3.5 (f)). Seguidamente foi limpa a argamassa que restou sobre o molde e procedeu-se à devida identificação do mesmo, através de uma etiqueta, eliminando assim qualquer hipótese de erro (Figura 3.5 (g)).

Após este processo os moldes foram, imediatamente, transportados para uma câmara de cura climatizada à temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e com humidade relativa de  $70 \pm 5\%$  onde permaneceram até à hora de desmoldagem (20 a 24h seguintes). É de evidenciar que os moldes foram tapados com uma placa de vidro seguindo-se de uma toalha húmida, garantindo, desta forma, condições constantes de cura em todas as situações (Figura 3.5 (h)).



**Figura 3.5** - Preparação dos provetes prismáticos. a) Mesa de compactação mecânica; b) Aplicação de óleo desmoldante no molde; c) Colocação do molde na mesa de compactação; d) Colocação da 1ª camada de argamassa; e) Recolha do excesso de argamassa com espátula; f) Regularização da superfície; g) Aspecto final do molde; h) Moldes na câmara de cura.

Passadas 20-24h [65] da moldagem iniciou-se a desmoldagem (Figura 3.6), cuidada, dos provetes com o apoio de um martelo de borracha para não danificar o provete bem como o próprio molde. Antes de se proceder à desmoldagem os provetes foram devidamente identificados com o nome da argamassa em estudo, idade do ensaio e nome do investigador (Figura 3.6 (a)).

Relativamente aos provetes destinados ao ensaio de capilaridade (descrito na Subsecção 3.3.6.4), a sua desmoldagem ocorreu somente após 48 horas da moldagem, seguindo-se deste modo os pressupostos descritos na EN 1015-18 [66].

Consecutivamente à desmoldagem dos provetes, concretizou-se a sua pesagem (Figura 3.6 (b)) e de seguida foram transportados, novamente, para a câmara de cura onde ficaram submersos, em água, até à data da realização do ensaio, respeitando-se o descrito na norma NP 196-1 [65] referente a este assunto (Figura 3.6 (c)).



**Figura 3.6** - Desmoldagem dos provetes prismáticos. a) Identificação dos provetes; b) Pesagem dos provetes; c) Colocação dos provetes em cura até à data do ensaio.

Os provetes realizados, com destino ao ensaio de capilaridade (Subsecção 3.3.6.4), ficaram no ambiente acima mencionado, somente durante 7 dias, tendo sido à posteriori retirados da água e colocados numa câmara de cura, cuja humidade relativa rondava os  $60 \pm 5\%$ .

### 3.3.4 Preparação dos modelos em suportes de tijolo

A elaboração de tijolos revestidos com as diferentes argamassas efetuadas neste estudo tem como finalidade a realização do ensaio de arrancamento por tração (subsecção 3.3.6.3). A sua preparação efetuou-se imediatamente após a elaboração das argamassas das diferentes séries e cumpriu o previsto na norma EN 1015-12 [67]. A respetiva argamassa foi aplicada em tijolos cerâmicos com dimensões de  $30 \times 20 \times 11 \text{ cm}^3$ , tendo-se, por cada tipo de argamassa, procedido à preparação de 1 um tijolo. A Figura 3.7 ilustra os passos elaborados até à conclusão do “proвете” de ensaio.

Como já descrito na secção 3.3.2. antes da aplicação da argamassa, efetua-se a verificação da sua consistência.

O material necessário para a execução da simulação de camadas de reboco está indicado no Quadro 3.7.

**Quadro 3.7** – Material e utensílios necessários para a obtenção de tijolos revestidos.

Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tijolo</li> <li>▪ Borrifador</li> <li>▪ Molde</li> <li>▪ Talocha</li> <li>▪ Colher de pedreiro</li> <li>▪ Régua metálica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Argamassa formulada</li> <li>▪ Água destilada</li> </ul>

Previamente à colocação da argamassa sobre a superfície de tijolo ocorreu a preparação da superfície através da colocação de moldes metálicos, segundo o maior comprimento (Figura 3.7(a)), tendo estes últimos como objectivo principal garantir a espessura de argamassa pretendida ( $10 \pm 1\text{mm}$ ). Existiu ainda, previamente, uma verificação visual de todos os tijolos com intenção de confirmar que os mesmos se encontravam nas perfeitas condições, ou seja, isentos de defeitos.

Posteriormente à colocação do molde e 5 minutos antes da aplicação da argamassa humedeceu-se a superfície do tijolo com um borrifador. A necessidade de humedecimento da superfície foi para evitar a absorção de água de amassadura por parte do suporte. Por outro lado, houve o cuidado de verificar se a zona antes da colocação da argamassa não apresentava água em excesso, pois caso acontecesse dificultava ou impedia a adequada aderência da argamassa ao tijolo.

Em seguida, aplicou-se a argamassa contra a superfície de tijolo, com recurso a uma colher de pedreiro (Figura 3.7 (b) e (c)). A aplicação foi realizada através de uma forte pressão para garantir a boa adesão entre a argamassa e o suporte. Após o preenchimento do suporte deixou-se em repouso cerca de 1 minuto. Posteriormente, removeu-se o excesso de material e procedeu-se ao alisamento e regularização da superfície com auxílio da talocha (Figura 3.7 (d)).

A utilização do molde que – como já se referiu atrás - teve como única finalidade garantir uma espessura uniforme da camada de argamassa, foi retirado quando se observou que a argamassa já tinha adquirido alguma consistência ( $\pm 15\text{ min.}$ )

Após a identificação dos tijolos, estes foram levados para uma sala onde se criaram, previamente, as condições atmosféricas pretendidas (temperatura a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa  $60 \pm 5\%$ ), sendo aí mantidos até aos 21 dias de cura. Nessa data os provetes de ensaio (preparados no laboratório do ISEL) foram transportados até aos laboratórios da CIARGA onde se procedeu à colagem das pastilhas metálicas e aí foram mantidos nas mesmas condições de cura anteriormente referidas, até à data de ensaio (ao fim de 28 dias).

Note-se que o procedimento acima descrito foi efetuado para todas formulações das argamassas que constituem a campanha experimental, listadas no Quadro 3.1.



**Figura 3.7** - Etapas para realização dos moldes com suporte de tijolo. a) Material necessário para a preparação dos tijolos revestidos; b) Aplicação da argamassa com colher de pedreiro; c) Suporte totalmente revestido com argamassa; d) Regularização da superfície; e) Regularização dos extremos do suporte; f) moldes após desmoldagem; g) Provetes com suporte de tijolo na câmara de cura.

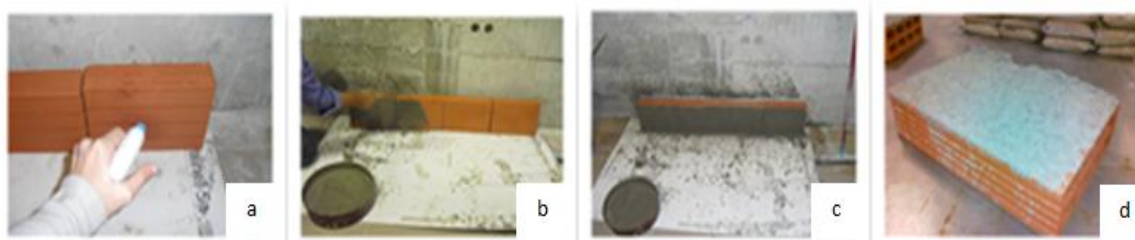
Com vista a melhorar o conhecimento de aderência, foi ainda realizado (por um pedreiro que se encontrava no laboratório) – para as argamassas cujo catalisador exausto de FCC se manteve com a sua granulometria original – moldes com uma camada de chapisco.

O chapisco consiste numa camada fina de argamassa aplicada sobre o tijolo com o propósito principal de criar uma superfície rugosa.

A Figura 3.8 ilustra, de forma sintética, as fases de execução da camada de chapisco. Em concreto, esta camada de chapisco foi realizada com uma argamassa preparada com cimento Portland Calcário CEM II/B-L da classe 32,5 N; areia média, usando um traço cimento e areia de 1:1,5.

Na elaboração da argamassa para a formulação da camada de chapisco começou por se colocar o cimento e a areia dentro de uma betoneira. De seguida, ligou-se a betoneira de modo a envolver os constituintes durante 5 minutos. Passado este tempo, introduziu-se a água e homogeneizou-se a mistura durante mais 15 minutos, obtendo-se desta forma a argamassa constituinte da camada de chapisco. A camada de chapisco apresenta uma espessura de  $3\pm 1\text{mm}$ .

Inicialmente, o tijolo foi molhado levemente com auxílio de um borrifador (Figura 3.8 (a)) e de seguida, foi executada a camada de chapisco com recurso a uma colher de pedreiro (Figura 3.8 (b) e (c)). Após a elaboração da referida camada, os tijolos permaneceram ao ar no laboratório, até a data da realização de ensaio, não sendo estes submetidos a condições especiais de cura (Figura 3.8 (d)).



**Figura 3.8** - Etapas para a realização da camada de chapisco. a) Humedecimento do suporte; b) Aplicação da argamassa; c) e d) Camada de chapisco finalizada.

### 3.3.5 Ensaios no estado fresco

Os ensaios efetuados para a caracterização das argamassas, no estado fresco consistiram na determinação das seguintes propriedades: consistência por espalhamento, massa volúmica e teor de ar.

#### 3.3.5.1 Consistência por espalhamento

O ensaio de consistência por espalhamento foi executado logo após a amassadura (Secção 3.3.2) de cada argamassa incluída no Quadro 3.1 tendo em conta o descrito na norma EN 1015-3 [68]. Este ensaio assumiu um papel importante no decorrer desta campanha experimental uma vez que teve como finalidade, não só a uniformização da consistência das argamassas ensaiadas como também a aferição da repetibilidade das diferentes amassaduras realizadas para cada formulação (Anexo D.3).

Este ensaio, segundo a norma, mede a fluidez e/ou grau de molhagem das argamassas frescas – logo após o processo de mistura descrito na secção 3.3.2 – dando informação da sua deformabilidade quando sujeitas a um determinado tipo de tensão, isto é, a capacidade da argamassa resistir às deformações que lhe são impostas [69]. Desta forma, conseguiu analisar-se a influência da incorporação de resíduo de FCC e a quantidade de superplastificante na consistência da argamassa formulada.

Os materiais e utensílios necessários na realização do ensaio apresentam-se indicados no Quadro 3.8.

**Quadro 3.8** -Material e utensílios necessários para a determinação da consistência das argamassas por espalhamento.

Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesa de espalhamento</li> <li>▪ Molde cónico truncado</li> <li>▪ Pilão</li> <li>▪ Régua metálica</li> <li>▪ Colher</li> <li>▪ Pano húmido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Argamassa formulada</li> </ul>

Na Figura 3.9 apresentam-se as etapas que ditaram a realização do ensaio de consistência por espalhamento.

Precedentemente à realização do ensaio, todos os utensílios foram humedecidos para que, aquando a realização deste, se assegurasse sempre o mesmo grau de humidade (fator condicionante para a não ocorrência de erros). Além disto, antes da utilização da argamassa, esta é remexida com uma colher durante 5 a 10 segundos, com a intenção de neutralizar qualquer falso ajustamento – isto é, verificar se de facto a mistura se apresenta perfeitamente homogeneizada.

O ensaio iniciou-se com a colocação centrada de um tronco cónico na mesa de espalhamento (Figura 3.9 (a)), seguindo-se o seu enchimento, com auxílio de uma colher em duas camadas de igual volume (Figura 3.9 (b-d)). Após a colocação de cada camada efetuou-se a sua compactação com 10 pancadas, no sentido horário, com auxílio de um pilão (Figura 3.9 (e)). Com o molde totalmente preenchido foi removida a argamassa excedente, através de uma régua metálica (Figura 3.9 (f)), tendo sido deixada, cuidadosamente, a área livre devidamente limpa e seca eliminando qualquer vestígio de argamassa ou água (Figura 3.9 (g)).

Decorridos 15 segundos retirou-se, lentamente, o molde através de um movimento firme e vertical (Figura 3.9 (h)) e de seguida iniciou-se a rotação manual do manípulo da mesa de

forma a compactar a argamassa com 15 pancadas através de um movimento constante e uma pancada por segundo (Figura 3.9 (i)).

Com recurso à régua metálica, mediu-se o diâmetro da argamassa ensaiada em duas direções ortogonais (Figura 3.9 (j)).



**Figura 3.9** - Etapas do ensaio de consistência por espalhamento. a) Mesa de espalhamento; b) Colocação da 1ª camada de argamassa; c) Compactação com pilão de madeira da 1ª camada; d) Colocação da 2ª camada de argamassa; e) Compactação da 2ª camada de argamassa; f) Regularização da superfície; g) Limpeza dos resíduos de argamassa; h) Levantamento do molde tronco-cónico; i) Execução das 15 pancadas; j) Medição do espalhamento com régua metálica.

#### ▪ RESULTADOS

O valor do espalhamento é obtido através da equação 3.1.

$$d_m = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ [mm]} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Em que,

$d_m$  – Diâmetro de espalhamento médio (mm)

$d_1, d_2$  – Diâmetro de espalhamento medidos (mm), em 2 direções diferentes e ortogonais.

É de notar que, se os valores individuais das 2 leituras se desviarem da média menos de 10%, utiliza-se esta média como valor da consistência da argamassa. Se por outro lado, o desvio for maior do que esse valor deve proceder-se à repetição do ensaio utilizando a mesma amostra, devendo aproveitar-se o valor do novo ensaio, caso os resultados diverjam da média menos de 10%. Se o acima exposto não se verificar considera-se o ensaio realizado sem efeito,

repetindo-se o procedimento com uma nova amostra resultante da preparação de outra argamassa fresca (Secção 3.3.2).

### 3.3.5.2 Massa volúmica

O ensaio para determinação da massa volúmica da argamassa foi realizado tendo por base a norma EN 1015-6 [70] e teve como principal objetivo analisar a influência dos diferentes constituintes da argamassa (resíduo de catalisador exausto petroquímico e superplastificante) e suas quantidades na massa volúmica. A realização deste ensaio iniciou-se quando concluído o ensaio de consistência por espalhamento (Subsecção 3.3.5.1).

O recipiente utilizado para a realização deste ensaio foi o mesmo que o utilizado para a determinação do teor de ar (Subsecção 3.3.5.3), desta forma, o procedimento para o enchimento do recipiente cilíndrico respeita a norma NP 1015-7 [71].

O material e utensílios necessários para a realização do ensaio encontra-se indicado no Quadro 3.9.

**Quadro 3.9-** Material e utensílios necessários na determinação da massa volúmica.

Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Balança de precisão 0,1 g</li> <li>▪ Recipiente</li> <li>▪ Colher</li> <li>▪ Pano húmido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Argamassa formulada</li> </ul>

Na Figura 3.10 apresenta-se a sequência de procedimentos para a determinação da massa volúmica.

Numa primeira fase, efetuou-se o humedecimento e pesagem do recipiente cilíndrico da massa (corresponde a  $m_1$  na equação 3.2) com vista à utilização no ensaio.

De seguida, com ajuda de uma colher, encheu-se o recipiente cilíndrico de massa conhecida até aproximadamente  $\frac{1}{4}$  do seu volume, ficando assim a primeira de quatro camadas introduzida. Logo depois compactou-se a camada colocada através da oscilação do recipiente em lados alternados a uma velocidade e altura constantes. Repetiu-se o mesmo procedimento para as 3 camadas seguintes.

Terminada a compactação da última camada retirou-se o excedente de argamassa e executou-se o alisamento da superfície com recurso a uma régua metálica. Posteriormente limpou-se a parte exterior do recipiente e os bordos para garantir a eliminação dos resíduos de argamassa fresca aí acumulados.

Por fim, advém a pesagem do conjunto registando-se o valor da massa (corresponde a  $m_2$  na equação 3.2).



**Figura 3.10** - Etapas do ensaio de massa volúmica. a) Pesagem do recipiente vazio; b) colocação da 1ª camada de argamassa; c) compactação da 1ª camada; d) recipiente totalmente preenchido de argamassa; e) Regularização da superfície; f) Limpeza dos detritos de argamassa; g) Pesagem do recipiente com argamassa.

▪ **RESULTADOS**

O valor da massa volúmica é obtido através da equação 3.2.

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

Em que,

$\rho_m$  – Massa volúmica da argamassa (kg/m<sup>3</sup>)

$m_1$  – Massa do recipiente cilíndrico (kg)

$m_2$  – Massa do recipiente cilíndrico com a argamassa no seu interior (kg)

$V$  – Volume de argamassa contida no interior do recipiente cilíndrico (m<sup>3</sup>)

### 3.3.5.3 Teor de ar

O ensaio realizado para a determinação do teor de ar foi efetuado tendo como referência a norma EN 1015-7 [71], mais concretamente através do emprego do “método A” (método de pressão) (descrito naquela norma) pois é o previsto para argamassas com teor de ar inferior a 20%. O volume de ar contido na argamassa fresca assume normalmente a denominação “teor de ar”.

O material e utensílios utilizados para a determinação do teor de ar, encontram-se indicados no Quadro 3.10.

**Quadro 3.10** -Material e utensílios necessários na determinação do teor de ar.

Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aerómetro (ATH)</li> <li>▪ Colher</li> <li>▪ Pano húmido</li> <li>▪ Régua metálica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Água destilada</li> <li>▪ Argamassa</li> </ul>

O ensaio explanado no Subsecção anterior (3.3.5.2) antecede o ensaio de determinação do teor de ar, deste modo, o procedimento descrito anterior é a primeira fase da realização deste ensaio, como se ilustra na Figura 3.10.

Deste modo, após a pesagem do recipiente com a argamassa (Figura 3.11 (b)), posicionou-se a campânula do aerómetro sobre este (Figura 3.11 (c)). Garantiu-se que a base do aerómetro assentou na parte metálica da base, permitindo uma vedação perfeita do conjunto (Figura 3.11 (d)).

Seguidamente abriram-se as válvulas de pressão de modo a saturar-se a amostra, dando-se o seu fecho simultâneo no instante em que começou a sair argamassa em fluxo contínuo pela válvula de saída do aerómetro.

Através do manípulo de compressão bombeou-se ar para dentro do recipiente de modo a aumentar a pressão, o processo foi repetido até o ponteiro ultrapassar a marca vermelha do visor do aerómetro em cerca de 10 mm (Figura 3.11 (e)). Acionou-se o botão de descompressão de forma a colocar o ponteiro no valor zero (Figura 3.11 (f)).

Finalmente premiu-se o botão teste e registou-se o valor indicado no mostrador que corresponde ao teor de ar (%) contido na argamassa formulada (Figura 3.11 (g)).



**Figura 3.11** - Etapas do ensaio de determinação do teor de ar. a) Aerómetro; b) Recipiente com argamassa; c) Colocação do aerómetro sobre o recipiente com argamassa; d) Injeção de água no aerómetro; e) Bombeamento; f) Correção do valor até zero; g) Início do teste e leitura do teor de ar; h) Finalização do ensaio.

### 3.3.6 Ensaio no estado endurecido

Para a caracterização das argamassas no estado endurecido foram realizados os seguintes ensaios com vista à determinação das seguintes propriedades: velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, determinação da resistência mecânica, aderência e absorção de água por capilaridade.

#### 3.3.6.1 Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas

A realização do ensaio conducente à determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas seguiu os procedimentos descritos na norma NP EN 12504-4 [72]. Esta norma foi concebida para ser aplicada em betão. No entanto, dada a ausência de normativas específicas para o cimento ou argamassas foi a adaptada neste trabalho. Na realização deste ensaio utilizaram-se provetes prismáticos cuja preparação e cura se apresenta descrita na secção 3.3.3, sendo testados 3 provetes para cada idade – isto é, aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias - de argamassa formulada.

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é um ensaio não destrutivo<sup>3</sup> que consiste na determinação da velocidade de propagação de um impulso ultrassônico entre dois pontos de um material, usando para o efeito dois transdutores um emissor e um recetor. A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pode ser correlacionada com outras características dos materiais nomeadamente, resistência mecânica (ver subsecção 4.3.2.3), densidade e a existência de defeitos como fissuras e vazios [73, 74].

O material e utensílios necessários à concretização deste ensaio encontram-se indicados no Quadro 3.11.

**Quadro 3.11-** Material e utensílios utilizados na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transdutores (54kHz e 150 kHz)</li> <li>▪ Aparelho ultrassons (TICO)</li> <li>▪ Osciloscópio (Tektronix -TSD 2004B)</li> <li>▪ Tabuleiro</li> <li>▪ Balança de precisão 0,1g</li> <li>▪ Pano húmido</li> <li>▪ Espátula</li> <li>▪ Guardanapos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Provetes prismáticos</li> <li>▪ Vaselina sólida</li> </ul>

Na Figura 3.12 apresenta-se, resumidamente, os procedimentos que se tiveram em conta para a execução do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas.

Aquando da realização do ensaio, os provetes foram retirados da câmara de cura onde se encontravam na sequência da preparação descrita na secção 3.3.3, tendo sido pesados e transportados até ao local do ensaio num tabuleiro (Figura 3.12 (b)). Os provetes foram cobertos com um pano húmido, para que durante a realização do ensaio de cada provete, os outros se mantivessem em condições de humidade constantes.

Antes do ensaio propriamente dito, realizou-se a calibração do equipamento de leitura da velocidade utilizando uma barra metálica calibrada pelo produtor do equipamento para a qual se sabe que o tempo de propagação da onda ultrassônica emitida por um transdutor com frequência de 54 kHz é igual a  $20,1 \pm 1 \mu\text{s}$ . Para o efeito, colocou-se vaselina nas faces de contacto -entre os transdutores – emissor e recetor – e barra, por forma a garantir o correto posicionamento destes (Figura 3.12 (c)). De seguida, procedeu-se à leitura do tempo da

<sup>3</sup> Entende-se como ensaio não destrutivo aquele que não altera, de forma permanente, as suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. O dano provocado por este é imperceptível ou nulo.

propagação da onda ultrassônica no percurso correspondente à barra metálica de calibração até este ser igual ao valor indicado pelo fabricante ( $20,1 \pm 1 \mu\text{s}$ ) (Figura 3.12 (d)).

Depois de calibrado, retirou-se a barra de calibração e colocou-se o primeiro dos 3 provetes a ensaiar. Tal como na barra de calibração, untou-se as extremidades do provete com vaselina de modo a ser possível uma correta aderência entre os transdutores e o provete (Figura 3.12 (e)). Seguidamente acionou-se o botão do aparelho TICO para emitir a onda, procedendo-se posteriormente, à leitura da sua velocidade e do tempo de percurso no visor do aparelho (Figura 3.12 (f)). Foram realizadas duas leituras por cada provete de ensaio.

Na presente dissertação, foram utilizados dois tipos de transdutores, com frequências<sup>4</sup> de 54kHz e 150kHz. A principal diferença destes dois transdutores, verificou-se essencialmente na onda obtida pelo osciloscópio, sendo que à frequência mais elevada está associada a uma maior sensibilidade do teste realizado. Pode então inferir-se que a resposta em frequência poderá complementar de forma mais detalhada as características do material, sendo este um tema importante de análise futura. O procedimento de determinação da velocidade de propagação dos ultrassons em cada provete foi repetido utilizando também transdutores com frequência de 150kHz.

Na instalação experimental utilizada (Figura 3.12 (a)), incluiu-se um osciloscópio (Figura 3.12 (g)), para que em cada ensaio para além da leitura da propagação da velocidade da onda ultrassônica, também se adquirisse o sinal elétrico associado à onda. Contudo, o processamento desta informação sai fora do âmbito da presente dissertação, pelo que não será objeto de análise neste documento, mas sim numa análise futura.



**Figura 3.12** - Etapas do ensaio de determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. a) Instalação experimental na realização do ensaio; b) Pesagem dos provetes prismáticos; c) Aplicação de vaselina nos transdutores; d) Calibração do aparelho; e) Aplicação de vaselina no provete; f) Determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas; g) Osciloscópio.

<sup>4</sup> Grandeza física associada a movimentos de características ondulatórias que indica o número de ciclos por unidade de tempo.

- **RESULTADOS**

O valor da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas é obtido através da equação 3.3.

$$v = \frac{L}{T} \text{ [m/s]} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Em que,

$v$  – Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas (m/s)

$L$  – Comprimento do percurso (m)

$T$  – Tempo que os ultrassons levam a atravessar o comprimento de percurso (s)

Evidencia-se que, o valor da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas para cada argamassa em estudo é arredondado à unidade (pelo aparelho Tico), sendo este valor o resultado da média das velocidades obtidas com os provetes ensaios.

### 3.3.6.2 Determinação da resistência mecânica

O ensaio para a determinação das resistências mecânicas – à flexão e à compressão – das argamassas formuladas (Quadro 3.1) foi realizado de acordo com o prescrito na norma NP 196-1 [65] utilizando os provetes preparados de acordo com o descrito na secção 3.3.3. Foram testados 3 provetes para cada argamassa e cada idade de ensaio (2, 7, 28, 56 e 90 dias).

O material e utensílios necessários na realização do ensaio de resistência mecânica encontram-se indicados no Quadro 3.12.

**Quadro 3.12** -Materiais necessários à realização do ensaio de resistência mecânica.

Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Máquina de ensaio da resistência mecânica (PERTA)</li> <li>▪ Pano húmido</li> <li>▪ Pincel</li> <li>▪ Balança de precisão 0,1g</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Provetes prismáticos</li> </ul>

Na Figura 3.13 apresentam-se as etapas que se adotaram para a realização do ensaio de resistência mecânica.

Os provetes que se destinaram à realização deste ensaio são os usados no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (subsecção 3.3.6.1). Desta forma,

previamente à realização deste ensaio, todos os provetes foram devidamente limpos e a máquina de ensaio foi limpa com recurso a um pincel.

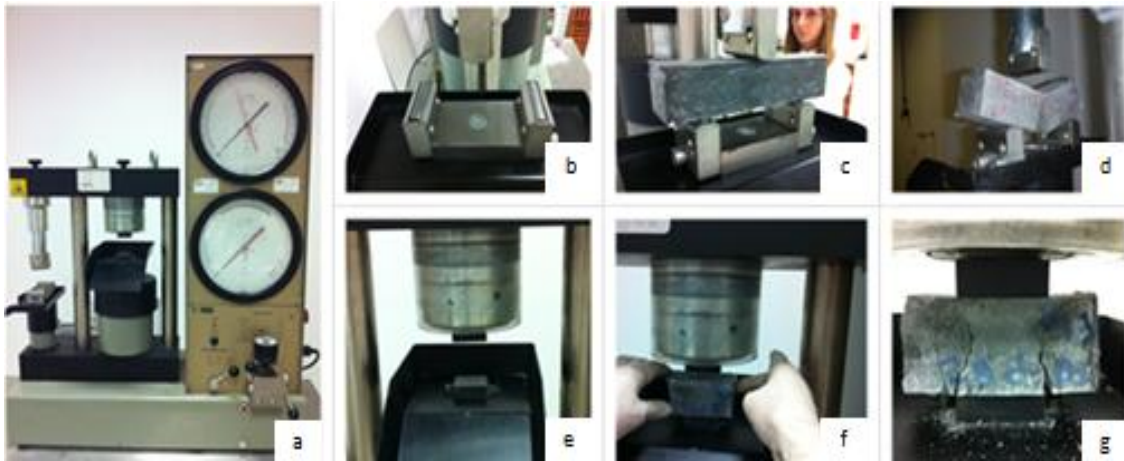
Relativamente ao ensaio de flexão, este iniciou-se com o posicionamento do provete perpendicularmente aos apoios cilíndricos metálicos e de forma centrada relativamente ao ponto de aplicação da forma (Figura 3.13 (b-c)).

De seguida, foi acionado o movimento descendente do cutelo da máquina até se estabelecer o contacto com a face do prisma. Quando tal se verificou, aplicou-se imediatamente uma força crescente de forma contínua e sem choques, a um ritmo de  $50 \pm 10 \text{ N/s}$ , até ocorrer a rotura do provete (Figura 3.13 (d)). O valor da força ficou automaticamente registado no visor da máquina, procedendo-se seguidamente à leitura deste (Figura 3.13 (a)).

O ensaio foi repetido para os provetes seguintes, tendo-se o devido cuidado de, entre os ensaios, limpar os fragmentos de argamassa oriundos do ensaio anteriormente executado.

Após o ensaio de flexão, executou-se o ensaio de resistência à compressão através dos 6 semi-prismas resultantes do ensaio de flexão. Iniciou-se o ensaio com o posicionamento centrado dos semi-prismas sobre o prato inferior da máquina (Figura 3.13 (e-f)). Seguidamente, foi ativado o manípulo da máquina fazendo com que o prato superior atingisse a face do prisma, sendo nesse momento aplicada uma força gradual, crescente e sem choques a uma velocidade de  $2400 \pm 200 \text{ N/s}$  até à rotura do semi-prisma (Figura 3.13 (g)). O valor da força, tal como no ensaio de flexão, ficou automaticamente registado na máquina (Figura 3.13 (a)).

Acrescenta-se ainda que, em ambos os ensaios- resistência à flexão e resistência à compressão -, os provetes foram corretamente posicionados garantindo que os apoios do equipamento que exerce a força a aplicar sobre os mesmos não tinham contacto direto com a face de enchimento do molde em que os provetes foram preparados. Desta forma, no ensaio de resistência à flexão a face de enchimento foi orientada para o lado direito (Figura 3.13 (c)) e no de compressão para a frente (Figura 3.13 (f)), garantindo assim que todos os provetes foram colocados de igual forma.



**Figura 3.13-** Etapas do ensaio de determinação da resistência mecânica. a) Máquina do ensaio de resistência mecânica; b) Máquina de resistência à flexão; c) Posicionamento do prisma para flexão; d) Determinação da resistência à flexão; e) Máquina de resistência à compressão; f) Posicionamento do semi-prisma para compressão; g) Determinação da resistência à compressão.

#### ▪ RESULTADOS

O valor da resistência à flexão é obtido através da equação 3.4.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \text{ [MPa ou N/mm}^2\text{]} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Em que,

$R_f$  – Resistência à flexão (MPa ou N/mm<sup>2</sup>)

$F_f$  – Força aplicada no centro do prisma de rotura (N)

$l$  – Distância entre apoios (mm), que no caso do equipamento usado é 100mm

$b$  – Lado da secção quadrada do prisma (mm) - (40mm)

É de salientar que o valor da resistência à flexão de cada provete é arredondado a 0,05 N/mm<sup>2</sup>, sendo a média dos valores obtidos arredondado a 0,1 N/mm<sup>2</sup>.

No que diz respeito ao cálculo da resistência à compressão, o valor é obtido através da equação 3.5.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ [MPa ou N/mm}^2\text{]} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Em que,

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

$F_c$  – Força de rotura à compressão (N)

$A$  – Área de aplicação da carga (mm<sup>2</sup>), que no caso do equipamento usado é (40mm×40mm)

Note-se que, se um dos resultados destes seis semi-prismas tiver uma variação superior  $\pm 10\%$  é eliminado, fazendo-se a média com os restantes cinco valores. Por outro lado, se um novo resultado entre estas cinco determinações variar mais que  $\pm 10\%$  é excluída toda a série de resultados.

### 3.3.6.3 Arrancamento por tração – Aderência

A realização do ensaio de arrancamento por tração, que permite a determinação da aderência da argamassa ao suporte – através da avaliação da força necessária para provocar o arrancamento por tração de uma pastilha metálica previamente colocada ao suporte, seguiu o prescrito na norma EN 1015-12 [67]. Na realização do referido ensaio utilizou-se um tijolo (preparado de acordo com o descrito na Secção 3.3.4) para cada argamassa em estudo referida no Quadro 3.1.

O material e utensílios necessários à realização do ensaio de arrancamento por tração apresentam-se indicados no Quadro 3.13.

**Quadro 3.13** – Material e utensílios necessários à realização do ensaio de arrancamento por tração.

Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Máquina de ensaio (HOYTOM – 07M6498.1)</li> <li>▪ Máquina de corte (Husqvarna TS – 300E)</li> <li>▪ Lápis</li> <li>▪ Régua</li> <li>▪ Escova de limpeza</li> <li>▪ Pastilhas metálicas quadradas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tijolos com camada de argamassa</li> <li>▪ Cola (Sikadur 30)</li> </ul>

Os provetes destinados ao ensaio de arrancamento por tração foram preparados de acordo com o descrito na secção 3.3.4. Após 21 dias da preparação destes provetes, estes foram submetidos a um processo de tratamento antes da realização do ensaio propriamente dito que se encontra esquematizado na Figura 3.14.

Previamente à realização do ensaio executou-se aos 21 dias de cura a marcação seguindo-se o corte, sobre a argamassa, das zonas onde foram inseridas as pastilhas metálicas (6 por tijolo) (Figura 3.14 (a-c)). O corte da argamassa – realizado pela zona da marcação – foi obtido através de uma máquina de corte utilizada a seco. Note-se que este corte foi realizado de maneira a que atravessasse não só a argamassa, mas também uma pequena espessura do tijolo (cerca de 0,2 mm).

De seguida, procedeu-se à limpeza da superfície com o intuito de retirar os detritos resultantes do corte (Figura 3.14 (d)). Uma vez limpa a superfície iniciou-se o processo de colagem de 6 pastilhas metálicas quadradas com dimensões de 50×50mm, por tijolo. Inicialmente utilizou-se a cola Araldit, no entanto, devido ao insucesso do ensaio – uma vez que a rotura se verificava sempre na Interface pastilha-argamassa invalidando-o – optou-se pela utilização da cola Sikadur 30 (Anexo B.5). Esta foi aplicada tanto na superfície de tijolo onde se introduziu a pastilha como na própria pastilha de modo a garantir uma correta fixação. Note-se que, quanto mais irregular era a superfície maior era a quantidade de cola aplicada de modo a assegurar uma correta aderência (Figura 3.14 (e-g)).

Finalizada a colagem das pastilhas os tijolos foram introduzidos novamente na câmara de cura – com as mesmas condições referidas na secção 3.3.4 – até à data do ensaio (Figura 3.14 (h)).



**Figura 3.14** - Preparação dos provetes para a realização do ensaio. a) Marcação dos provetes; b) Corte dos provetes; c) Provete após o corte; d) Limpeza dos detritos resultantes do corte; e) Aplicação de cola na zona de inserção da bolacha metálica; f) Aplicação de cola na bolacha metálica; g) Fixação da bolacha metálica na argamassa; h) Aspeto final dos provetes antes na realização do ensaio.

Passados 28 dias de cura, procedeu-se à realização do respetivo ensaio, do qual se apresentam imagens na Figura 3.15. O tijolo foi retirado da câmara de cura (Figura 3.15 (b)) e colocado na máquina de ensaio (Figura 3.15 (a)). Depois da execução do correto posicionamento da pastilha metálica e respetiva fixação ao aparelho (Figura 3.15 (c)), deu-se início ao ensaio com a aplicação de uma força perpendicular à pastilha metálica, (Figura 3.15 (d)).

Após a rotura da ligação obtida entre a pastilha metálica e o suporte/tijolo, retirou-se a pastilha metálica ensaiada (Figura 3.15 (e)), e repetiu-se o ensaio para as restantes bolachas coladas no mesmo suporte/tijolo (Figura 3.15 (f-g)).

Salienta-se que a rotura pode dar-se em três zonas diferentes do sistema suporte/argamassa:

- i. Fratura na interface entre a argamassa e o suporte: rotura adesiva;
- ii. Fratura interna do suporte ou da argamassa: rotura coesiva;
- iii. Fratura na interface da bolacha com a argamassa, ou seja, na zona da cola. Neste caso, o ensaio não é considerado válido e tem que se repetir o teste para a argamassa formulada, até obter um total de pelo menos 5 pastilhas metálicas com rotura do tipo adesiva ou coesiva.



**Figura 3.15** - Etapas do ensaio de arrancamento por tração- Aderência. a) Máquina de ensaio de aderência; b) Provete na câmara de cura, antes da realização do ensaio; c) Aplicação da força de tração na bolacha metálica; d) Arrancamento da bolacha metálica; e) Bolacha metálica após arrancamento; f) e g) Aspecto dos provetes após realização do ensaio.

#### ▪ RESULTADOS

O valor da carga de rotura de arrancamento foi obtido diretamente pelo equipamento de ensaio, em MPa. O valor da tensão adesiva é obtido através da equação 3.6.

$$F_a = \frac{F_r}{A} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Em que,

$F_a$  – Tensão de aderência (N/mm<sup>2</sup>)

$F_r$  – Força de rotura por tração (N)

$A$  – Área da superfície da bolacha de teste quadrada (mm<sup>2</sup>), que no caso dos testes efetuados é (50mm×50mm)

O valor da força adesiva de cada pastilha metálica é arredondado a 0,05 N/mm<sup>2</sup>, sendo a média dos valores obtidos arredondado a 0,1 N/mm<sup>2</sup>.

#### 3.3.6.4 Absorção de água por capilaridade

A realização do ensaio, conducente à determinação da absorção de água por capilaridade seguiu o procedimento descrito na norma EN 1015-18 [66]. Porém, para uma melhor análise gráfica, teve-se ainda em atenção o documento normativo E 393-1993 [75] do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) no que respeita aos tempos de pesagem.

A execução deste ensaio é importante para as argamassas em estudo uma vez que permite avaliar de que maneira a substituição parcial de cimento por resíduo de FCC influencia na absorção capilar. Este consiste na avaliação da evolução da quantidade de água absorvida por capilaridade, ou seja, não é mais do que a medição em intervalos fixos, do incremento de massa originado pela absorção capilar.

Na realização deste ensaio partiram-se 3 provetes prismáticos cuja preparação foi descrita na secção 3.3.3 para o estudo de cada argamassa formulada (Quadro 3.1). O Quadro 3.14 apresenta o material e os utensílios necessários para a correta execução do ensaio de absorção de água por capilaridade.

**Quadro 3.14** – Material e utensílios necessários para realização do ensaio de absorção de água por capilaridade.

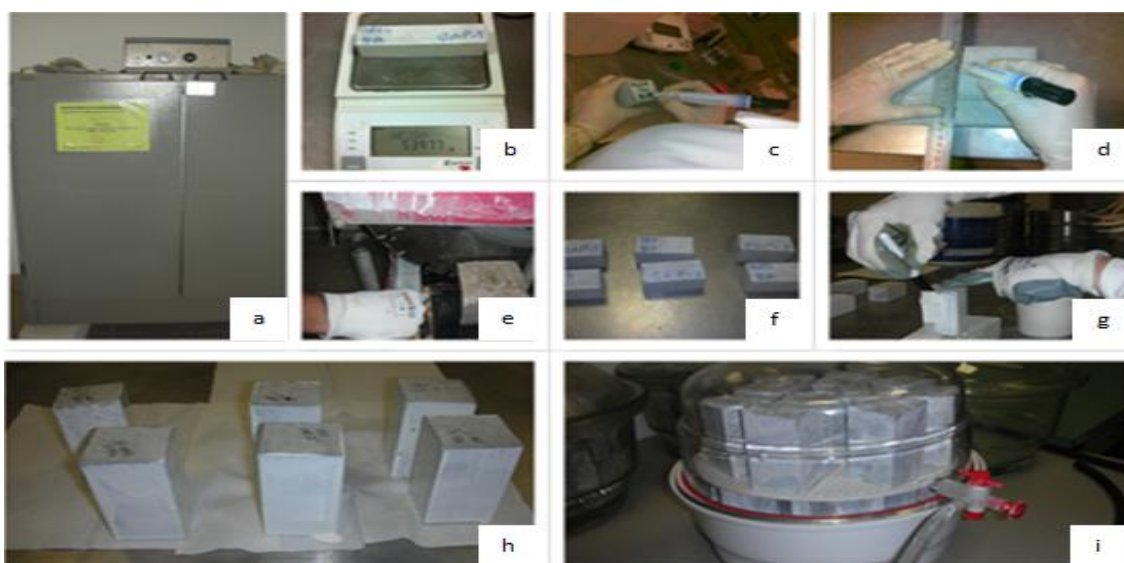
Utensílios	Componentes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Máquina de Corte (Husqvarna TS – 300E)</li> <li>▪ Pincel</li> <li>▪ Balança de precisão 0,01 g</li> <li>▪ Aquário</li> <li>▪ Estufa (60±5°C) (PERTA)</li> <li>▪ Papel absorvente</li> <li>▪ Régua</li> <li>▪ Esguicho</li> <li>▪ Relógio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Provetes</li> <li>▪ Cola impermeabilizante (Icosit K101)</li> <li>▪ Água destilada</li> </ul>

Na Figura 3.16 apresenta-se a sequência da preparação dos provetes para a realização do ensaio de capilaridade.

Passados os 28 dias de hidratação, os provetes foram pesados e acomodados numa estufa a  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.16 (a)) até se obter massa constante<sup>5</sup> que demorou, tipicamente 15 dias (Figura 3.16 (b)). Depois da estabilização das respetivas massas os 3 provetes foram retirados da estufa e cortados com auxílio de uma máquina de corte, de modo a obter-se 6 semi-prismas (Figura 3.16 (d-f)).

Após o corte dos provetes, as 4 faces de cada semi-prisma foram barradas com uma cola impermeabilizante (Anexo C.4) com o intuito de ficarem devidamente seladas. A cola foi aplicada duas vezes em cada face, com um intervalo entre elas de cerca de 1h (Figura 3.16 (g-h)).

Em seguida, os provetes foram colocados num exsicador (Figura 3.16 (i)) até à realização do ensaio para garantir que se encontravam devidamente secos aquando o início deste.



**Figura 3.16** - Preparação dos provetes para a realização do ensaio de capilaridade. a) Estufa; b) Pesagem dos provetes até massa constante; c) Identificação dos provetes antes do corte; d) Marcação dos provetes; e) Corte dos provetes; f) Provetes após o corte; g) Aplicação da tinta impermeabilizante; h) Provetes antes da colocação do exsicador; i) Provetes no exsicador até à data do ensaio.

Na Figura 3.17 apresentam-se, resumidamente, as etapas necessárias para determinar a absorção de água por capilaridade das argamassas apresentadas no Quadro 3.1.

<sup>5</sup> Considera-se “ massa constante” quando a variação de massa é inferior a 0,2% em leituras consecutivas de 24h.

Imediatamente antes da realização do ensaio os semi-prismas foram pesados (Figura 3.17 (a-b)) e colocados dentro de uma tina com uma linha de água constante de 5 a 10 mm (Figura 3.17 (c)). Os provetes foram inseridos dentro da tina com um ângulo de 45º, de modo a evitar a acumulação de bolhas de ar na face inferior do provete.

Para que o nível de água se mantivesse constante e para evitar a evaporação de água contida no recipiente, este foi devidamente tapado com uma placa de vidro plana.

Após 10 minutos do início do ensaio, os semi-prismas foram retirados, a superfície imersa limpa com papel absorvente e posteriormente foram pesados. Concluídas as referidas pesagens, os provetes foram reposicionados na tina. O procedimento foi repetido ao fim de 90 minutos, obtendo-se os valores das massas necessários para a determinação do valor de absorção de água por capilaridade (Equação nº 3.7). É de realçar que não se efetuaram leituras entre os 10 e 90 minutos para garantir que os semi-prismas ficavam, o devido tempo imersos, respeitando o procedimento prescrito na norma EN 1015-18 [66].

De modo a avaliar a quantidade de água absorvida ao longo do tempo, o processo anteriormente mencionado, foi repetido após 2h, 3h, 5h, 6h, 12h, 24h e 72h de imersão dos semi-prismas em água.

Aquando da realização do ensaio os provetes permaneceram na zona de ensaio, tendo sido observados diariamente. Quando se verificou que o semi-prisma se encontrava totalmente saturado – isto é, quando leituras consecutivas apresentavam massas constantes –, procedeu-se à destruição do mesmo através de uma pancada forte com um martelo, na base do semi-prisma para verificar visualmente se o semi-prisma se encontrava de facto totalmente saturado.



**Figura 3.17** - Etapas do ensaio de determinação do ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Pesagem dos provetes antes da realização do ensaio; b) Provetes após pesagem; c) Início do ensaio de absorção de água por capilaridade.

▪ RESULTADOS

O coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $c$ ) traduz a velocidade de absorção de água e é dado pelo declive da reta que une os pontos correspondentes aos instantes 10 ( $M1$ ) e 90 ( $M2$ ) minutos. O valor de  $c$  é obtido através da equação 3.7.

$$c = 0,1(M2 - M1) [Kg/(m^2 \cdot min^{0,5})] \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Em que,

$c$  – Coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $Kg/(m^2 \cdot min^{1/2})$ )

$M1$  – Massa do provete ao fim de 10 minutos (g)

$M2$  – Massa do provete ao fim de 90 minutos (g)

O coeficiente de absorção médio – abreviadamente  $c_m$  – para cada argamassa em estudo (Quadro 3.1) é obtido pela média aritmética dos valores obtidos nos seis semi-prismas.

É de salientar que, como foi anteriormente mencionado, realizaram-se outras pesagens de modo a obter uma curva de absorção capilar que relaciona a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do provete.

Esta curva é obtida com base na equação 3.8.

$$Q_i = m_i - m_1 [g] \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Em que,

$Q_i$  – Massa de água absorvida até ao instante  $i$  (g)

$m_1$  – Massa do provete seco (g)

$m_i$  – Massa do provete no instante  $i$  (g)

# 4

## **Apresentação, Análise e Discussão dos Resultados**

*“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no  
dicionário”*

Albert Einstein

## 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo evidencia os resultados obtidos nos ensaios realizados ao longo da campanha experimental descritos no Capítulo 3. Estes resultados apresentam-se sob forma de representações gráficas e quadros com o intuito de verificar o efeito das diferentes distribuições de tamanho partícula de resíduo de FCC incorporado no desempenho das argamassas bem como as diferenças constatadas consoante a metodologia experimental adotada, isto é, mantendo o teor de SP constante ou a mantendo a consistência constante (explicado na secção 3.3.1).

Como já descrito no subcapítulo 3.1, prepararam-se duas séries de argamassas que se encontram descritas no Quadro 3.1, sendo que em cada série existe uma argamassa de referência (argamassas sem incorporação de resíduo de FCC) de forma a avaliar os efeitos da incorporação de diferentes percentagens de resíduo de FCC nas propriedades das argamassas em estudo.

Adicionalmente, foram realizadas sempre que possível, comparações entre os resultados alcançados na campanha experimental e os obtidos por outros investigadores que desenvolveram trabalhos similares – com o mesmo ou outros materiais pozolânicos – no que diz respeito à influência da distribuição do tamanho de partícula nas propriedades da argamassa.

Neste capítulo, como forma de sistematização, a análise efetuada será realizada individualmente para cada uma das séries de argamassas comparando os resultados obtidos nessa série com a respetiva argamassa de referência e posteriormente, será feita uma análise comparativa entre as duas séries, evidenciando as tendências obtidas para cada uma. Adicionalmente, para a mesma DTP de resíduo, os gráficos apresentam sempre a mesma cor, sendo sempre diferenciados por séries, sendo as representações gráficas das correlações ilustradas com uma cor diferente da das séries existentes.

Conforme descrito anteriormente na secção 3.3.1, a argamassa com a notação 15F\_C (Quadro 3.1), foi usada para estabelecer a quantidade de superplastificante a utilizar nas argamassas da série cujo teor de SP é constante. Por este motivo, a argamassa com 15% (em massa) de incorporação de catalisador não moído é a mesma para as duas séries preparadas porque por um lado foi a argamassa que definiu a quantidade de SP necessária à série teor de SP constante e por outro lado, a consistência determinada para a preparação desta argamassa foi

assumida para que se obtivesse uma consistência igual à argamassa de referência 100C inserindo-se assim também na série consistência constante. De forma a facilitar a interpretação das representações gráficas ilustradas ao longo deste capítulo, definiu-se para esta argamassa dois nomes distintos dependendo da série das argamassas com a qual vai ser comparada em cada momento:

- 15F\_SP: quando se está a comparar com as argamassas da série teor de SP constante
- 15F\_C: quando se está a comparar com as argamassas da série consistência constante

Contudo, deve ter-se presente que se trata de facto da mesma argamassa.

Por fim, os valores dos resultados obtidos na campanha experimental e que foram utilizados para a elaboração dos gráficos e tabelas que se apresentam ao longo deste capítulo, estão sistematizados numa “ficha de resultados” para cada argamassa em estudo no Anexo D.4.

## 4.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

### 4.2.1 Consistência por espalhamento

---

A trabalhabilidade das argamassas elaboradas ao longo da campanha experimental foi avaliada através do ensaio de consistência por espalhamento (subsecção 3.3.5.1).

O ensaio de consistência por espalhamento teve como principal objetivo avaliar o efeito provocado pela alteração de DTP de resíduo de FCC na trabalhabilidade das argamassas.

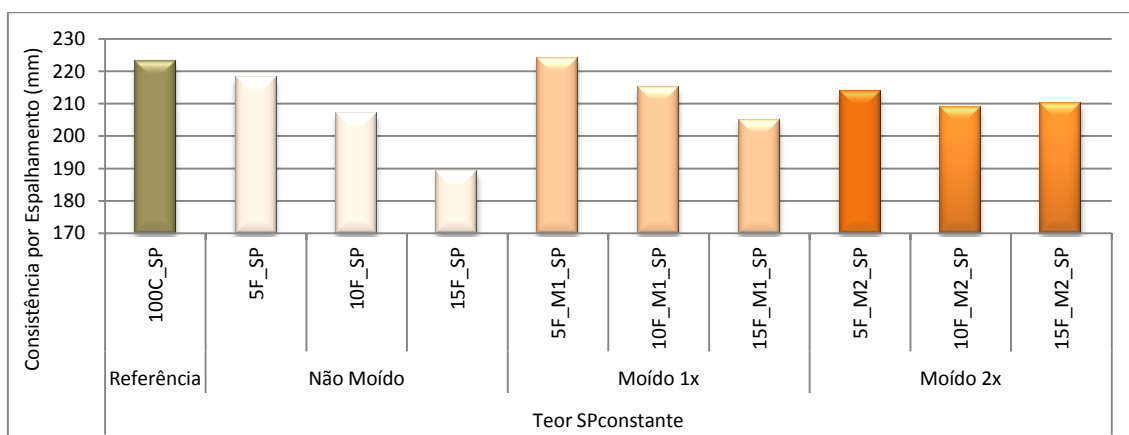
Como já descrito no subcapítulo 3.2, a quantidade de SP foi mantida constante para uma das séries – série teor de SP constante – e alterada para outra – série consistência constante -, de acordo com os objetivos definidos em termos de trabalhabilidade para cada série.

#### I. Argamassas com teor de SP constante:

No Quadro 4.1 apresentam-se sistematizados os resultados do ensaio de mesa de espalhamento para a série teor de SP constante. De forma a colocar em evidência o efeito da moagem do resíduo de FCC na trabalhabilidade das argamassas, para o mesmo teor de resíduo incorporado, estes valores apresentam-se na Figura 4.1.

**Quadro 4.1** - Consistência por espalhamento das argamassas em estudo e respectiva quantidade de superplastificante adicionado a cada argamassa.

Série	Formulação	SP (g)	dm (mm)	
Teor SP constante	Referência	100C_SP	223	
	Não Moído	5F_SP	5,4	218
		10F_SP		207
		15F_SP*		189
	Moído 1x	5F_M1_SP		224
		10F_M1_SP		215
		15F_M1_SP		205
	Moído 2x	5F_M2_SP		214
		10F_M2_SP		209
		15F_M2_SP		210

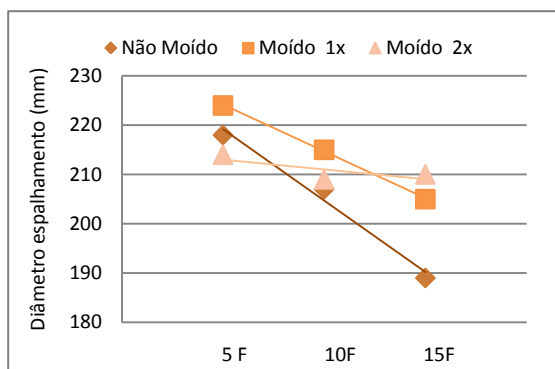


**Figura 4.1** - Consistência por espalhamento (mm) para as argamassas da série teor de SP constante.

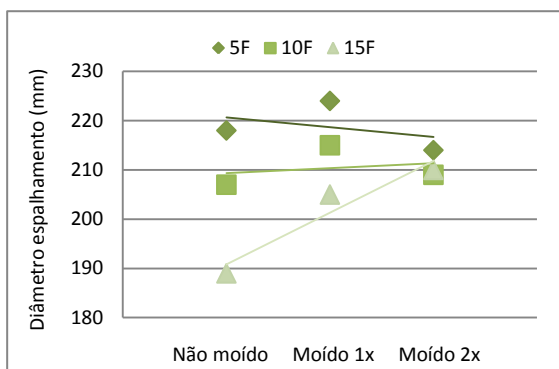
Analisando os valores de consistência obtidos por espalhamento – Quadro 4.1 e Figura 4.1 – verifica-se que a argamassa conducente a um maior valor de mesa de espalhamento é a 5F\_M1\_SP.

Através da análise dos resultados que se apresentam no Quadro 4.1 e Figura 4.1 constata-se que todas as argamassas – à exceção da 5F\_M1\_SP – apresentam valores de espalhamento inferiores à argamassa de referência (100C\_SP).

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam o diâmetro de espalhamento médio obtido para as argamassas com teor de SP constante, evidenciando-se na Figura 4.2 o efeito ocorrido na trabalhabilidade da argamassa à medida que se aumenta progressivamente a quantidade de resíduo de FCC e na Figura 4.3 a influência da DTP na consistência quando se mantêm a mesma percentagem de substituição.



**Figura 4.2** - Consistência por espalhamento (mm) e respectiva reta de regressão linear das argamassas da série Teor de SP constante, por porcentagem de resíduo adicionado



**Figura 4.3** - Consistência por espalhamento (mm) e respectiva reta de regressão linear das argamassas da série Teor de SP constante, por distribuição do tamanho de partícula do resíduo adicionado.

Da análise da representação gráfica da Figura 4.2 verifica-se que a substituição parcial de cimento por resíduo de FCC traduz-se numa diminuição da trabalhabilidade da argamassa à medida que se aumenta a porcentagem de substituição. Esta tendência verifica-se para as diferentes finuras do resíduo, no entanto, esta diminuição da fluidez da argamassa é atenuada à medida que a finura do resíduo aumenta.

Através da análise da Figura 4.3 constata-se que, quando se mantém a mesma porcentagem de substituição de resíduo de FCC e se altera a DTP, a trabalhabilidade da argamassa nem sempre apresenta a mesma tendência, isto é, para uma menor finura não ocorre necessariamente um aumento da trabalhabilidade. Concretamente, a argamassa que contém na sua constituição resíduo moído 1x evidencia para substituições de 5% e 10% valores superiores quando comparada com a argamassa cujo resíduo introduzido foi moído 2x.

Adicionalmente, quando analisadas as várias porcentagens de substituição – 5, 10 e 15% – observa-se que as argamassas diferem o seu comportamento consoante a quantidade de resíduo adicionado. Assim, quando se substitui 5% de cimento por resíduo verifica-se uma tendência na diminuição da trabalhabilidade com o aumento da finura e para substituições de 10% e 15% o comportamento inverte-se, ou seja, o aumento da finura traduz-se no aumento da trabalhabilidade e conseqüentemente origina argamassas mais fluídas. Note-se que este aumento da trabalhabilidade da argamassa é mais significativo para a substituição de 15%, em massa, de cimento por resíduo de FCC do que para a substituição de 10%.

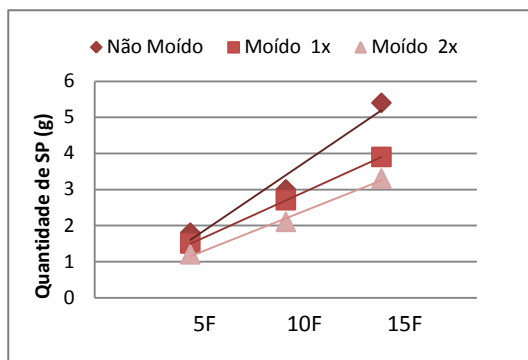
Os resultados apresentados na Figura 4.2, à exceção da argamassa 5F\_M1\_SP, apresentam-se em conformidade com estudos anteriores realizados por diversos investigadores [3, 51, 52, 7, 8] que comprovaram que a incorporação de resíduo de FCC diminui a fluidez da argamassa.

## II. Argamassas com consistência constante

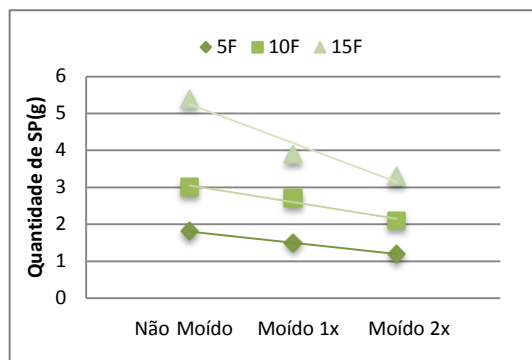
Relativamente às argamassas que constituem a série consistência constante, tal como o nome indica, foram preparadas (descrito na secção 3.3.2) adicionando teor de SP que garantisse trabalhabilidade semelhante, isto é, que as suas consistências se encontrassem num intervalo não superior a 5mm da argamassa de referência desta série, que corresponde à argamassa para a qual se adotou a notação 100C (Quadro 3.1).

Desta forma, tratando-se de argamassas cujos valores de espalhamento são sensivelmente iguais, nesta secção analisa-se e discute-se a quantidade de SP adicionada a cada argamassa (que se apresentou no Quadro 3.4), de modo a que a trabalhabilidade destas se mantivesse constante, relativamente ao teor de resíduo incorporado e à DTP.

As Figuras 4.4 e 4.5 pretendem clarificar a influência do aumento da percentagem de incorporação com a quantidade de superplastificante para a mesma finura e a influência da DTP na quantidade de SP adicionado, respectivamente.



**Figura 4.4** – Quantidade de SP (g) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série Consistência constante, por percentagem de resíduo adicionado.



**Figura 4.5** – Quantidade de SP (g) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série Consistência constante, por distribuição do tamanho de partícula do resíduo adicionado.

Da análise dos dados representados na Figura 4.4 observa-se, como se esperava, que a quantidade de superplastificante necessário à cada argamassa para que se mantenha a consistência constante aumenta à medida que a substituição parcial de cimento por resíduo aumenta, independentemente da DTP do resíduo. A argamassa 15F\_C é a conducente a uma maior quantidade de superplastificante para obter a trabalhabilidade pretendida.

Pela observação conjunta dos valores apresentados no Quadro 3.4 e representados na Figura 4.5, verifica-se que para as argamassas formuladas com o mesmo teor de resíduo de FCC incorporado, quanto maior a DTP de resíduo maior é a quantidade de SP a adicionar. Torna-se assim evidente que a diminuição de DTP do resíduo de FCC introduzido na argamassa conduz a

uma redução da quantidade de superplastificante necessário para que se obtenha a mesma trabalhabilidade quando a percentagem de substituição se mantém constante. Porém, repara-se pela análise da referida figura que a diminuição da quantidade de SP torna-se mais acentuada à medida que se aumenta a percentagem de substituição.

O resultado obtido não era o esperado, uma vez que, tipicamente, a diminuição do tamanho da partícula aumenta a sua área superficial específica e portanto esperar-se-ia o aumento da necessidade de adicionar SP [58]. O facto de não ser este o resultado que se verifica neste trabalho exigiria trabalho de investigação adicional para esclarecimento. No entanto, a influência da DTP na fluidez das argamassas em que são adicionadas também está associado a outras características, como é o caso da forma e textura da partícula que podem conduzir a que um aumento da finura não se traduza necessariamente na perda de fluidez.

De facto, conclusões de outros estudos realizados até ao momento não se mostram coerentes e revelam que a trabalhabilidade da argamassa pode aumentar [63, 76, 77] como diminuir [78, 58] com a diminuição da distribuição média das partículas de resíduo: nestes trabalhos a explicação para estas diferenças de comportamento têm sido essencialmente atribuídas à forma que as partículas do resíduo apresentam. Um estudo realizado anteriormente - inserido no projeto em que este estudo foi realizado – o autor observou que a moagem do resíduo conduziu a um aumento da trabalhabilidade das argamassas, indo desta forma, de encontro aos resultados obtidos na campanha efetuada nesta dissertação [8].

Assim, seguindo o raciocínio anterior, pode dizer-se no caso do catalisador de FCC em estudo que a quantidade de SP necessária para argamassa apresentar a mesma fluidez varia da seguinte forma: moído 2x < moído 1x < não moído

#### **4.2.2 Massa volúmica**

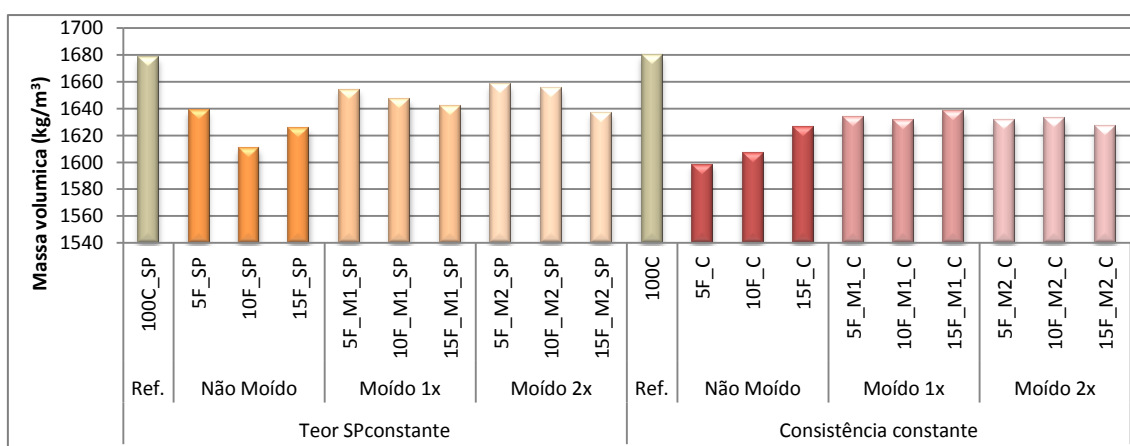
---

O Quadro 4.2 e a Figura 4.6 expõem os valores de massa volúmica das argamassas em estudo, referidas no Quadro 3.1. A determinação da massa volúmica, foi realizada de acordo com os procedimentos referidos na subsecção 3.3.5.2. Os resultados serão primeiramente analisados individualmente por série e posteriormente será realizada uma análise comparativa das duas séries.

**Quadro 4.2** - Massa volúmica das argamassas em estudo.

Série	Formulação	Massa Volúmica Real(kg/m <sup>3</sup> )	Série	Formulação	Massa Volúmica Real(kg/m <sup>3</sup> )		
Teor SP constante	Referência	100C_SP	Consistência constante	Referência	100C		
	Não Moído	5F_SP		1639	Não Moído	5F_C	1598
		10F_SP		1610		10F_C	1607
		15F_SP*		1626		15F_C*	1626
		5F_M1_SP		1654		5F_M1_C	1634
	Moído 1x	10F_M1_SP		1647	Moído 1x	10F_M1_C	1631
		15F_M1_SP		1642		15F_M1_C	1638
		5F_M2_SP		1658		5F_M2_C	1632
		10F_M2_SP		1655		10F_M2_C	1633
	Moído 2x	15F_M2_SP		1637	Moído 2x	15F_M2_C	1627

15F\_C\* e 15F\_SP\* correspondem à mesma composição de argamassa (como explicado no subcapítulo 4.1). Contudo, como os resultados obtidos com esta argamassa podem ser comparados com os resultados das outras argamassas de cada uma das “séries” preparadas, assumiu-se designações distintas quando se pretendeu comparar com cada uma das séries



**Figura 4.6** - Massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>) das diferentes argamassas em estudo.

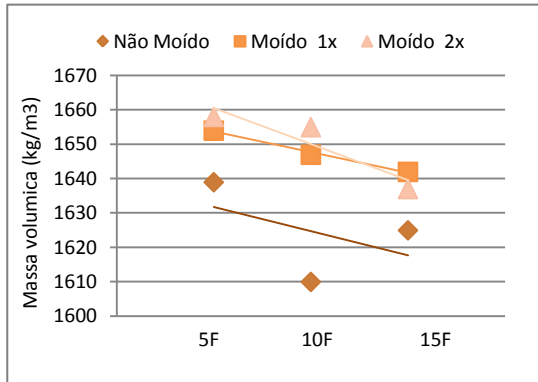
Pela análise das diferentes séries, observa-se que as argamassas de referência de cada série são as que apresentam maiores valores de massa volúmica, e que os valores obtidos são sensivelmente iguais. Nesta perspetiva, observa-se que a introdução de SP não altera de forma significativa a massa volúmica da argamassa.

Através de uma apreciação global, verifica-se que as argamassas que conduzem a uma maior oscilação entre os valores obtidos à medida que se aumenta o teor de resíduo são as que contêm resíduo de FCC não moído.

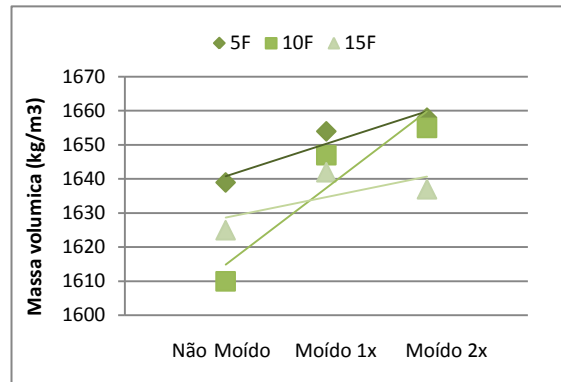
#### I. Argamassas com teor de SP constante:

Pela observação do Quadro 4.2 e da Figura 4.6 pode concluir-se que quando comparadas com a argamassa de referência, todas as argamassas que contêm na sua constituição resíduo de FCC apresentam valores de massa volúmica inferiores, independentemente da percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 apresentam-se as representações dos valores incluídos no Quadro 4.2 para a série teor de SP constante com o objectivo de evidenciar os efeitos na massa volúmica quando se aumenta o teor de incorporação de resíduo de FCC e quando se aumenta o grau de finura mantendo-se o mesmo teor de incorporação, respectivamente.



**Figura 4.7** - Massa volúmica e respetivas retas de regressão linear das argamassas referentes à série teor de SP constante, por percentagem de resíduo adicionado.



**Figura 4.8** - Massa volúmica e respetivas retas de regressão linear das argamassas referentes à série teor de SP constante, por distribuição do tamanho de partícula de resíduo adicionado.

Por observação da representação gráfica da Figura 4.7, constata-se que, tipicamente ocorre uma diminuição da massa volúmica com o aumento progressivo da quantidade de resíduo de FCC às argamassas, com a exceção do valor obtido para a argamassa 10F\_SP. No entanto, esta diminuição é mais acentuada nas argamassas cujo resíduo se apresenta moído 1x e 2x. Note-se que o valor de massa volúmica obtido para a argamassa 10F\_SP não se apresenta coerente, desta forma, as argamassas que apresentam na sua constituição resíduo não moído apesar de se verificar uma ligeira tendência da diminuição da massa volúmica, os resultados não se apresentam conclusivos.

Da análise da Figura 4.8 deteta-se que as argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de FCC moído 1x e 2x apresentam uma massa volúmica superior àquelas em que este se apresenta não moído. Quando analisadas as várias percentagens de substituição – 5, 10 e 15% – observa-se que a utilização de resíduo em detrimento de cimento traduz-se num aumento da massa volúmica à medida que se diminui a DTP.

Este fenómeno pode ser atribuído pela ocorrência do efeito “*filler*”, isto é, as partículas com dimensão mais fina originadas pela moagem preenchem os espaços vazios, aumentando a compacidade da argamassa [79].

No caso das argamassas com resíduo de FCC não moído, estudos realizados por outros autores revelam-se coerentes com este estudo, isto é, que existe – de forma geral – uma tendência para a diminuição da massa volúmica com o aumento de incorporação de resíduo nas

argamassas [7, 8]. De acordo com estudo um estudo anterior - inserido no projeto em que este estudo foi realizado - o autor conclui que nas argamassas cuja DTP do resíduo de FCC apresentam valores inferiores também se verifica uma tendência para a diminuição da massa volúmica à medida que se aumenta a substituição parcial de cimento por resíduo de FCC moído [8].

A Figura 4.9 apresenta a correlação entre a massa volúmica e a consistência por espalhamento das argamassas que constituem a série teor de SP constante.

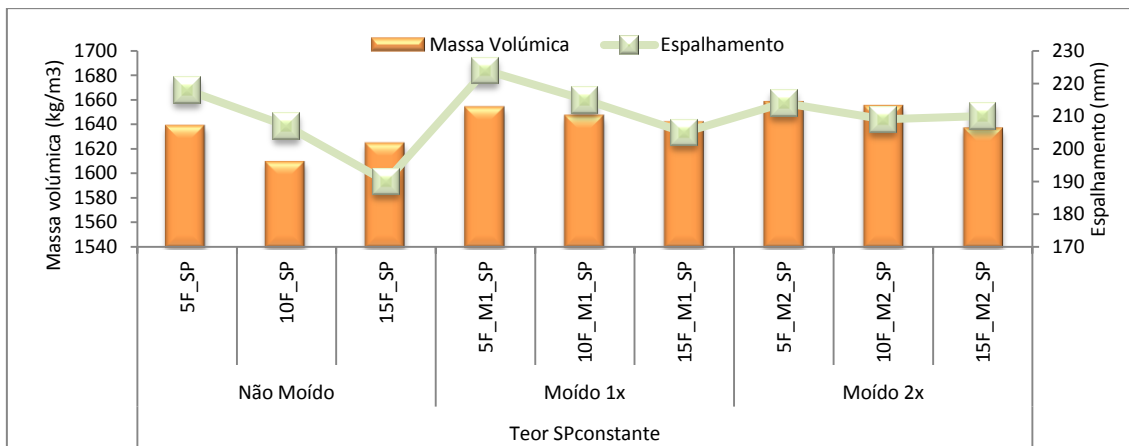
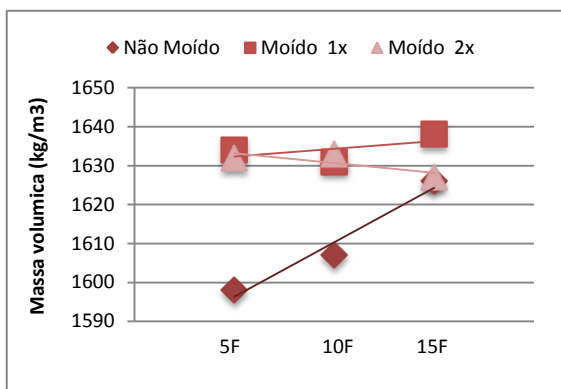


Figura 4.9 - Relação entre a massa volúmica e a consistência por espalhamento das argamassas da série com teor de SP constante.

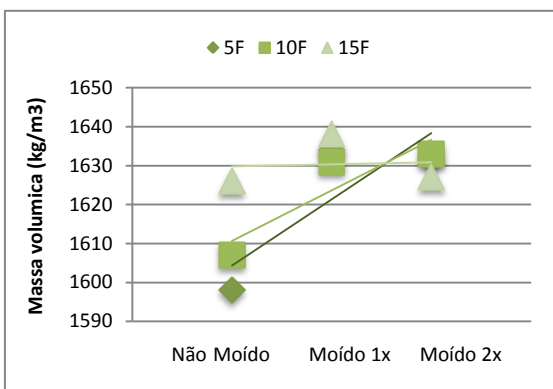
Pela observação dos resultados representados na Figura 4.9 verifica-se que, tipicamente, à medida que ocorre a diminuição da massa volúmica a trabalhabilidade da argamassa também diminui. A relação entre estas duas grandezas que se constatou neste trabalho é semelhante à de estudos realizados anteriormente, nos quais os autores verificam que estas também apresentam as mesmas tendências de variação isto é, à medida que ocorre um aumento da massa volúmica, a consistência por espalhamento também aumenta [80, 81, 7, 8].

## II. Argamassas com consistência constante

Os valores de massa volúmica para a série consistência constante encontram-se sistematizados no Quadro 4.2 e representados nas Figuras 4.10 e 4.11 como forma de realçar os resultados de massa volúmica obtidos com o aumento progressivo de resíduo de FCC (Figura 4.10) e a influência da finura na massa volúmica, para as mesmas percentagens de substituição (Figura 4.11).



**Figura 4.10** - Massa volúmica e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por percentagem de resíduo adicionado.



**Figura 4.11** - Massa volúmica e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por distribuição do tamanho de partícula de resíduo adicionado.

Da análise da Figura 4.10 observa-se que as argamassas que apresentam na sua constituição resíduo não moído, à medida que se aumenta a substituição de cimento por resíduo de FCC a massa volúmica aumenta. Contrariamente, para as argamassas que contêm o mesmo resíduo moído 1x e 2x, a massa volúmica não alteram significativamente, verificando-se uma estabilização de valores com o aumento progressivo da quantidade de resíduo de FCC existente na argamassa.

Da observação dos dados representados na Figura 4.11, verifica-se a inexistência de uma relação entre os resultados de massa volúmica e a finura, existindo uma oscilação dos valores para a mesma percentagem de substituição à medida que a DTP diminui. Observa-se que até aos 10% de incorporação de resíduo a tendência obtida é de aumentar a massa volúmica à medida que a finura das partículas do resíduo aumenta. Por outro lado, para 15% de substituição os valores de massa volúmica obtidos não são particularmente sensíveis à moagem do resíduo incorporado.

### III. Comparação genérica das duas séries

Através da observação da Figura 4.6 verifica-se que, tipicamente as argamassas da série com teor de SP constante apresentam valores de massa volúmica superiores quando comparadas com a série das argamassas com consistência constante, para a mesma percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC.

#### 4.2.3 Teor de ar

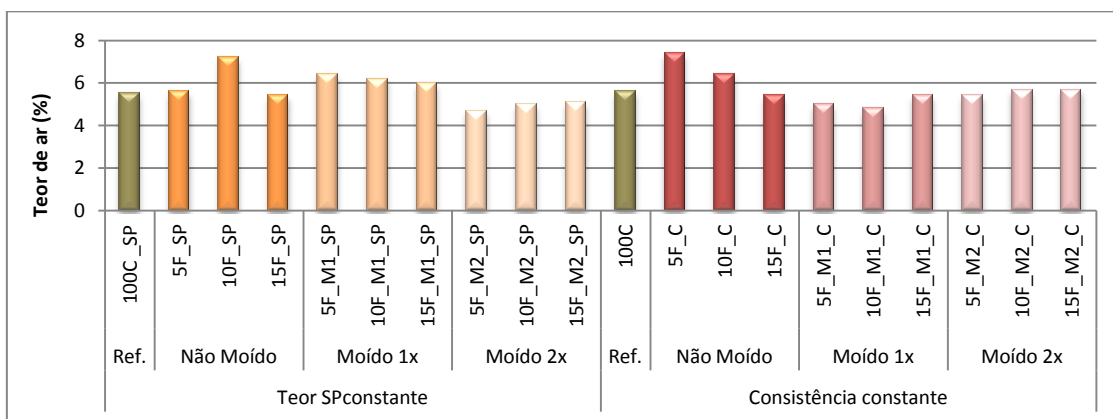
Designa-se por “teor de ar” a quantidade de ar existente num certo volume de argamassa. O Quadro 4.3 e a Figura 4.12 exibem os valores de teor de ar das argamassas em estudo,

referidas no Quadro 3.1. A determinação do teor de ar, foi realizado de acordo com os procedimentos referidos na Subsecção 3.3.5.3

**Quadro 4.3** - Teor de ar obtido para as argamassas de referência e para as argamassas com substituição parcial do cimento para as diferentes séries presentes na campanha experimental.

Série	Formulação	Teor de ar (%)	Série	Formulação	Teor de ar (%)		
Teor SP constante	Referência	100C_SP	5,5	Consistência constante	Referência	100C	5,6
	Não Moído	5F_SP	5,6		Não Moído	5F_C	7,4
		10F_SP	7,2			10F_C	6,4
		15F_SP*	5,4			15F_C*	5,4
	Moído 1x	5F_M1_SP	6,4		Moído 1x	5F_M1_C	5,0
		10F_M1_SP	6,2			10F_M1_C	4,8
		15F_M1_SP	6,0			15F_M1_C	5,4
	Moído 2x	5F_M2_SP	4,7		Moído 2x	5F_M2_C	5,4
		10F_M2_SP	5,0			10F_M2_C	5,7
		15F_M2_SP	5,1			15F_M2_C	5,7

15F\_C\* e 15F\_SP\* correspondem à mesma composição de argamassa (como explicado no subcapítulo 4.1). Contudo, como os resultados obtidos com esta argamassa podem ser comparados com os resultados das outras argamassas de cada uma das "séries" preparadas, assumiu-se designações distintas quando se pretendeu comparar com cada uma das séries



**Figura 4.12** - Teor de ar (%) das argamassas estudadas.

Através de uma apreciação global da representação gráfica da Figura 4.12 pode reter-se que a argamassa conducente a um maior valor de teor de ar é a 5F\_C. Os resultados obtidos para as argamassas de referência apresentam valores muito próximos, como se pode verificar no Quadro 4.3. Deste modo, pode concluir-se que nesta característica o superplastificante adicionado às argamassas não altera esta propriedade nas mesmas, não ocorrendo deste modo um aumento ou diminuição do teor de ar no estado fresco.

Note-se que o valor de teor de ar obtido pela argamassa 10F\_SP pode não ser o representativo desta argamassa, uma vez que, aquando a realização do ensaio observou-se saída de água do aerómetro.

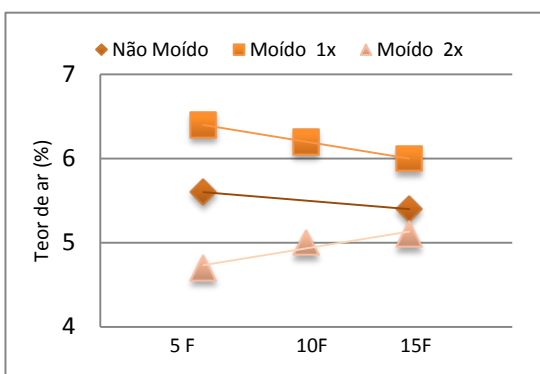
De seguida, irá proceder-se a uma análise detalhada e individualizada das diferentes séries presentes neste trabalho experimental.

### I. Argamassas com teor de SP constante

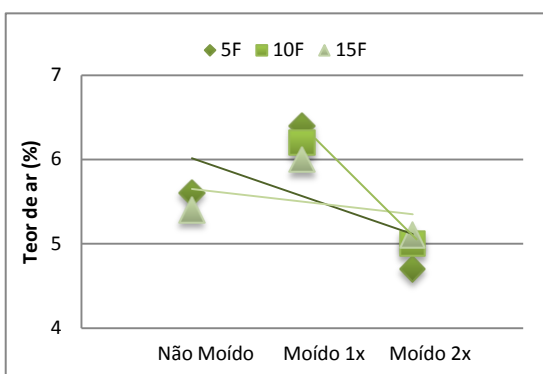
Através da análise da Figura 4.12 constata-se que a adição de resíduo de FCC não moído e moído 1x em detrimento do cimento apresentam valores de teor de ar superiores ao da argamassa de referência (100C\_SP). Por outro lado, a argamassa que na sua constituição contém resíduo de FCC moído 2x, os resultados de teor de ar, quando comparados com a argamassa 100C\_SP apresentam-se sempre inferiores aos desta argamassa.

Na análise da série referida como teor de superplastificante constante não se terá em conta o valor obtido pela argamassa 10F\_SP, pelo já exposto anteriormente.

Na Figura 4.13 e 4.14 expõem-se as representações dos valores incluídos no Quadro 4.3 para a série teor de SP constante com o objectivo de evidenciar os efeitos no teor de ar quando se aumenta a quantidade de resíduo FCC e quando se aumenta o grau de finura mantendo-se o mesmo teor de incorporação, respectivamente.



**Figura 4.13** - Teor de ar e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série teor de SP constante, por percentagem de resíduo adicionado.



**Figura 4.14** - Teor de ar e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série teor de SP constante, por dimensão de partícula do resíduo adicionado.

De acordo com os resultados obtidos na da Figura 4.13 verifica-se que, o teor de ar não apresenta sempre a mesma tendência à medida que se aumenta a substituição – em massa – de cimento por resíduo de FCC. Nas argamassas cujo resíduo se encontra não moído e moído 1x verifica-se uma tendência de diminuição do teor de ar com o aumento o incremento do resíduo. Por outro lado, para a argamassa que composta por resíduo moído 2x verifica-se uma tendência de aumento ligeiro do teor de ar presente na amassadura à medida que se aumenta a quantidade de resíduo.

Através da mesma representação gráfica pode ainda aferir-se que a argamassa conducente a um maior teor de ar, para todas as percentagens de substituição, é a que apresenta o resíduo moído 1x, seguindo-se a argamassa com FCC não moído e por fim aquela cuja DTP é a mais reduzida – moído 2x.

Pela observação da Figura 4.14 conclui-se que para a mesma percentagem de substituição de resíduo de FCC não se tiram relações conclusivas dos resultados obtidos no teor de ar à medida que se diminui a DTP, isto é, os resultados de teor de ar não se apresentam uma relação direta com as alterações de tamanho de partícula que se impuseram neste trabalho. No entanto, verifica-se uma tendência para a diminuição do teor de ar com a diminuição de DTP.

A Figura 4.15 apresenta a correlação entre o teor de ar e a massa volúmica das argamassas que constituem a série teor de SP constante.

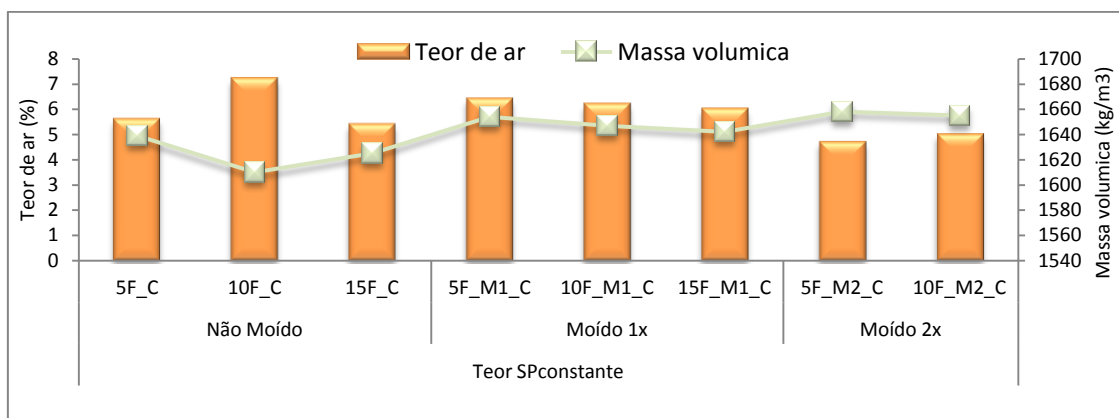


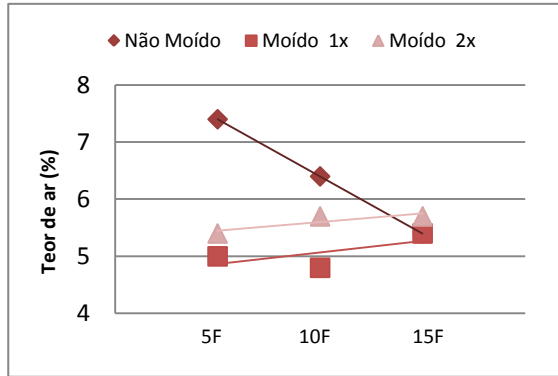
Figura 4.15 - Relação entre o teor de ar e massa volúmica das argamassas da série com teor de SP constante.

Analisando os resultados expostos na Figura 4.15 observa-se que nas argamassas em estudo o teor de ar relaciona-se com a massa volúmica da argamassa. Concluindo-se que, tipicamente, um maior valor de massa volúmica está associado a um menor valor de teor de ar e vice-versa. Estes resultados estão de acordo com os pressupostos teóricos porque à medida que o teor de ar aumenta, a massa volúmica da argamassa diminui [82], uma vez que a quantidade de vazios é superior, resultando desta forma uma menor quantidade de massa.

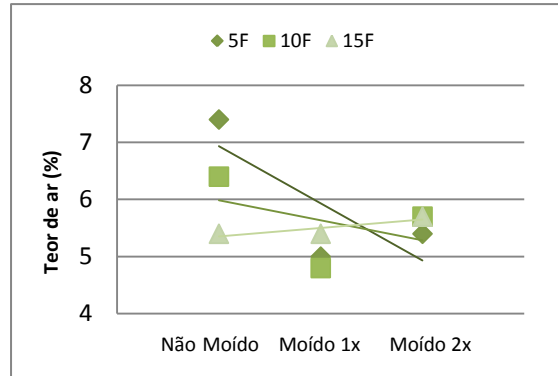
## II. Argamassas com consistência constante:

Verifica-se pela análise da representação gráfica da Figura 4.12 que, dentro desta série de argamassas, aquelas que contêm resíduo não moído são as que apresentam maiores valores de teor de ar.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 apresentam-se as representações dos valores incluídos no Quadro 4.3 para a série consistência constante com o objectivo de evidenciar os efeitos provocados no teor de ar: i) quando se aumenta o teor de incorporação de resíduo de FCC e ii) quando se aumenta o grau de finura mantendo-se o mesmo teor de incorporação.



**Figura 4.16** - Teor de ar e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por percentagem de resíduo adicionado.



**Figura 4.17** - Teor de ar e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por dimensão da partícula de resíduo adicionado.

Através da análise da Figura 4.16 verifica-se que a tendência, com o aumento progressivo de resíduo de FCC nas argamassas, varia consoante a finura do resíduo incorporado. Assim, observa-se uma diminuição do teor de ar com a incorporação de resíduo de FCC não moído nas argamassas. Por outro lado, nas argamassas que apresentam resíduo de FCC moído 1x e 2x verifica-se uma ligeira tendência para o aumento da substituição parcial de cimento por resíduo.

Note-se, que quando o resíduo se apresenta moído 1x ou 2x as alterações observadas com o aumento da percentagem de substituição são muito ligeiras, sendo a variação máxima de 0,6%. Nas argamassas em que o mesmo resíduo não se encontra moído verificam-se variações máximas de 2%.

Tal como se verifica para a série anterior, da representação gráfica apresentada na Figura 4.17, observa-se que não existe uma relação evidente entre a finura do resíduo de FCC e os resultados obtidos para o teor de ar. No entanto, pela análise da referida Figura retém-se que para 5% e 10% de substituição parcial de cimento por resíduo o teor de ar tendencialmente diminui com o aumento da finura do resíduo de FCC. Contrariamente, a substituição de 15%, em massa, de cimento por resíduo de FCC traduz-se num ligeiro aumento do teor de ar à medida que a DTP diminui.

A Figura 4.18 expõe a relação entre o teor de ar e a massa volúmica das argamassas que constituem a série consistência constante.

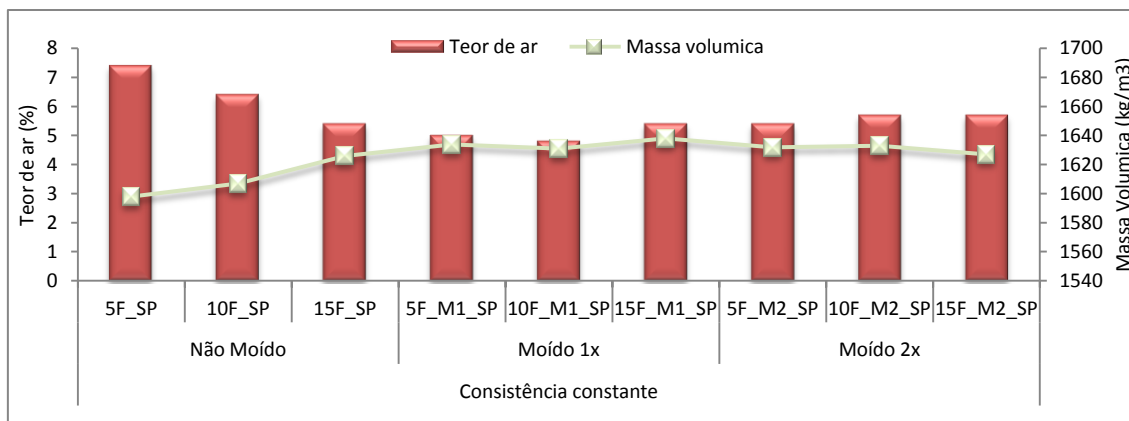


Figura 4.18 - Relação entre o teor de ar e massa volúmica das argamassas da série com consistência constante.

Analisando os resultados da Figura 4.18 observa-se que o teor de ar se relaciona com a massa volúmica das argamassas em estudo. Verifica-se que, tipicamente, um maior valor de massa volúmica associa-se a um menor valor de teor de ar e vice-versa.

### III. Comparação genérica das duas séries:

Através da análise da Figura 4.12, conclui-se que para ambas a séries uma diminuição de DTP traduz uma ténue nos valores de teor de ar, isto é, para ambas as séries quando o resíduo se apresenta moído 1x e 2x, os valores obtidos à medida que se aumenta a percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC não apresentam grandes oscilações.

Como descrito anteriormente, quando comparadas as argamassas de referência das duas séries em estudo, verificou-se que a introdução de superplastificante não conduzia a uma alteração dos resultados obtidos para o teor de ar presente nas argamassas. Desta forma, esperar-se-ia que as tendências observadas, em relação ao teor em ar, para as argamassas duas séries preparadas deveriam ser as mesmas. De facto, para ambas as séries com incorporações de resíduo até 10% existe, tipicamente, uma tendência para a diminuição do valor de teor de ar à medida que a finura do resíduo de FCC aumenta (Figuras 4.14 e 4.17). No entanto, quando comparadas as argamassas das duas séries com 15% de incorporação de resíduo, as tendências não coincidem: na série de argamassas com teor de SP constante existe uma tendência para a diminuição do teor de ar à medida que se aumenta a finura. Na série cujas argamassas apresentam consistência constante verifica-se o contrário (Figuras 4.14 e 4.17).

Adicionalmente observa-se ainda que um aumento do teor de ar traduz, normalmente, uma diminuição na massa volúmica em ambas as séries.

## 4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

### 4.3.1 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi avaliada em provetes prismáticos, de acordo com os procedimentos descritos na subsecção 3.3.6.1. Como já referido anteriormente, este ensaio foi realizado para todas as idades de cura das argamassas (2, 7, 28, 56, 90 dias). O resultado deste ensaio consiste numa média de 3 provetes. Porém, aos 28 dias de hidratação, verifica-se a exceção, e as leituras foram efetuadas em 6 provetes uma vez que estes eram necessários para o ensaio de resistência mecânica – ensaio realizado posteriormente ao ensaio de determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas encontra-se correlacionado com o ensaio de resistência à compressão na subsecção 4.3.1.3.

No Quadro 4.4 e 4.5 apresentam-se os resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para a série teor de SP constante e consistência constante, respetivamente.

**Quadro 4.4** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas (m/s) obtidas para as argamassas da série teor de SP constante.

Série	Transdutores	Formulação	DIAS				
			2d	7d	28d	56d	90d
Teor SP constante	Referência	100C_SP	4320	4530	4510	4625	4630
	Não Moído	5F_SP	4217	4420	4512	4615	4620
		10F_SP	4093	4418	4444	4620	4547
		15F_SP	4007	4287	4363	4437	4465
		Moído 1x	5F_M1_SP	4233	4460	4494	4608
	10F_M1_SP		4153	4403	4503	4528	4597
	15F_M1_SP		4093	4360	4413	4472	4503
	Moído 2x	5F_M2_SP	4228	4483	4550	4643	4607
		10F_M2_SP	4202	4440	4465	4550	4593
		15F_M2_SP	4070	4290	4448	4577	4572
	Referência	100C_SP			4610	4625	4648
	Não Moído	5F_SP			4498	4603	4608
		10F_SP			4439	4540	4593
		15F_SP			4412	4470	4520
		Moído 1x	5F_M1_SP			4538	4573
10F_M1_SP				4521	4537	4558	
15F_M1_SP				4442	4495	4485	
Moído 2x	5F_M2_SP			4641	4583	4635	
	10F_M2_SP			4557	4575	4547	
	15F_M2_SP			4438	4493	4547	

**Quadro 4.5** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas (m/s) obtidas para as argamassas da série consistência constante.

Série	Transdutores	Formulação	DIAS				
			2d	7d	28d	56d	90d
Consistência constante	Referência	100C	4337	4460	4540	4613	4592
	Não Moído	5F_C	4037	4222	4499	4523	4537
		10F_C	4027	4305	4463	4552	4503
		15F_C	4007	4287	4363	4437	4465
		5F_M1_C	4323	4372	4488	4630	4578
	Moído 1x	10F_M1_C	4088	4360	4467	4510	4540
		15F_M1_C	4008	4170	4398	4522	4512
		5F_M2_C	4190	4432	4484	4563	4593
	Moído 2x	10F_M2_C	4067	4320	4408	4593	4595
		15F_M2_C	3983	4303	4403	4413	4448
		Referência	100C		4610	4593	4618
	Não Moído	5F_C			4460	4485	4510
		10F_C			4456	4428	4498
		15F_C			4412	4520	4520
		5F_M1_C			4478	4542	4523
Moído 1x	10F_M1_C			4450	4520	4518	
	15F_M1_C			4403	4465	4477	
	5F_M2_C			4456	4520	4568	
Moído 2x	10F_M2_C			4444	4515	4547	
	15F_M2_C			4398	4470	4495	

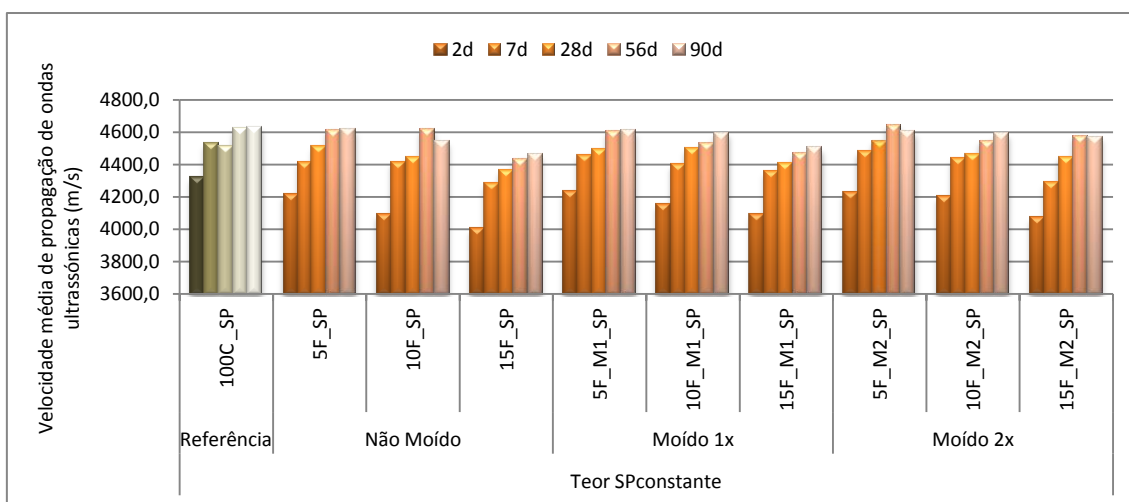
Os resultados apresentados nos Quadros 4.4 e 4.5 serão representados, adiante, nas Figuras 4.19 e 4.23, respectivamente.

Nos Quadros 4.4 e 4.5 os valores obtidos com transdutores de 150 kHz aparecem apenas a partir dos 28 dias de hidratação (uma vez que estes não se apresentavam disponíveis aquando do início da campanha experimental). Este ensaio apesar de ser efetuado aos 2 e 7 dias de cura para algumas das argamassas apresentadas no Quadro 3.1, no sentido de uniformização de resultados, optou-se por apresentar apenas os resultados obtidos a partir dos 28 dias.

Note-se que, tal como descrito na subsecção 3.3.6.1, na determinação deste ensaio, foram ainda obtidas as representações das ondas longitudinais através do osciloscópio. A título de exemplo apresentam-se as ondas longitudinais obtidas na argamassa 100C\_SP – 1dose no Anexo E.1.

#### I. Argamassas com teor de SP constante:

A representação gráfica dos resultados apresentados no Quadro 4.4 para a série teor de SP constante com a utilização dos transdutores de 54kHz apresentam-se ilustrados na Figura 4.19.



**Figura 4.19** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas para as argamassas da série teor de SP constante, utilizando transdutores de 54 kHz.

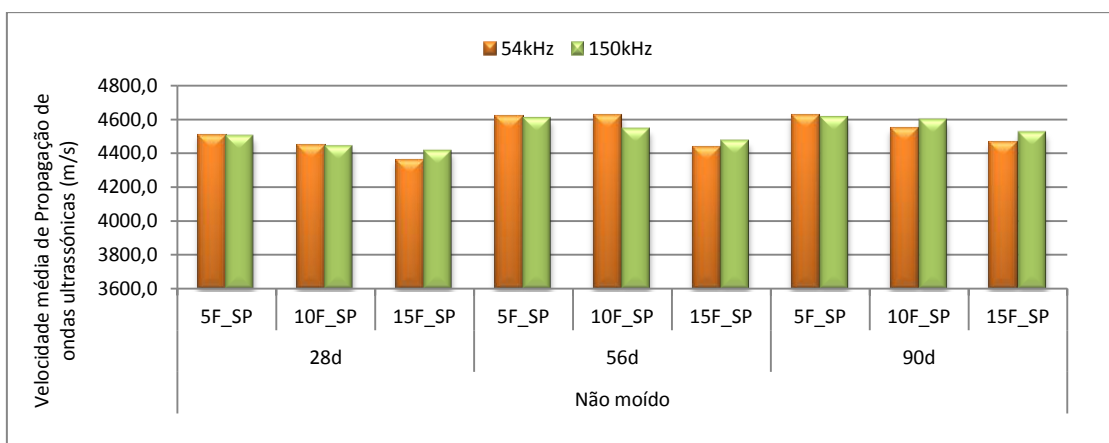
Através de uma apreciação global da Figura 4.19, verifica-se que a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas aumenta com o aumento da idade de cura das argamassas. No entanto, a partir dos 56 dias de idade, as variações entre valores não são significativas, dando-se por vezes, uma diminuição da velocidade das ondas aos 90 dias de idade, nomeadamente para as argamassas 10F\_SP e 5F\_M2\_SP. Esta diminuição não era expectável, uma vez que, teoricamente, com o aumento do tempo de hidratação ocorre uma densificação da matriz dos materiais à base de cimento, originando uma argamassa mais compacta na qual a propagação da onda ultrassônica é facilitada pelo que a velocidade da onda aumenta [83]. Uma justificação para estas duas argamassas apresentarem esta descida pode dever-se à ocorrência de fissuras nos provetes de teste para esta idade.

Quando comparada com as argamassas da série teor de SP constante, a argamassa de referência (100C\_SP) apresenta sempre valores superiores de velocidade de propagação das ondas até aos 7 dias de cura. Nesta série a argamassa conducente ao maior valor de velocidade de propagação da onda é referente à argamassa 5F\_M2\_SP aos 56 dias de idade (4643m/s).

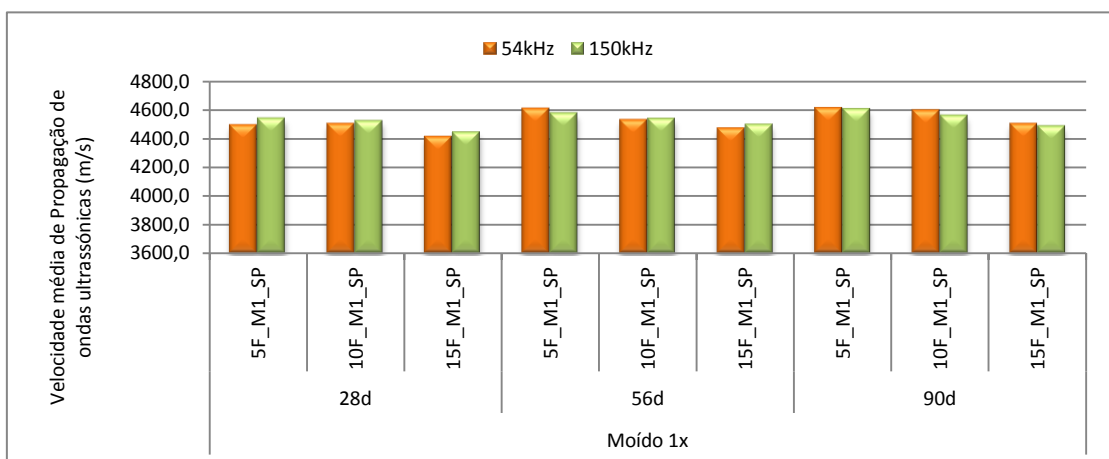
Globalmente, independentemente da DTP do resíduo adicionado, à medida que se verifica o aumento da adição de resíduo de FCC nas argamassas ocorre uma diminuição da velocidade de propagação da onda, em todas as idades de cura. A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas revelou-se pouco sensível à diminuição da DTP. Esta constatação também tinha sido verificada noutro estudo realizado com cinza de casca de arroz [84]. Porém, note-se que para a argamassa 15F\_M2\_SP os resultados obtidos estão muito próximos dos da argamassa de referência, o que não se verifica para as argamassas contendo resíduo não moído e moído

1x, para a mesma percentagem de substituição. Note-se, no entanto, que este ensaio foi realizado com o propósito de verificar se existe de facto uma boa correlação dos resultados obtidos neste ensaio e no ensaio de resistência à compressão (ver subsecção 4.3.2.3)

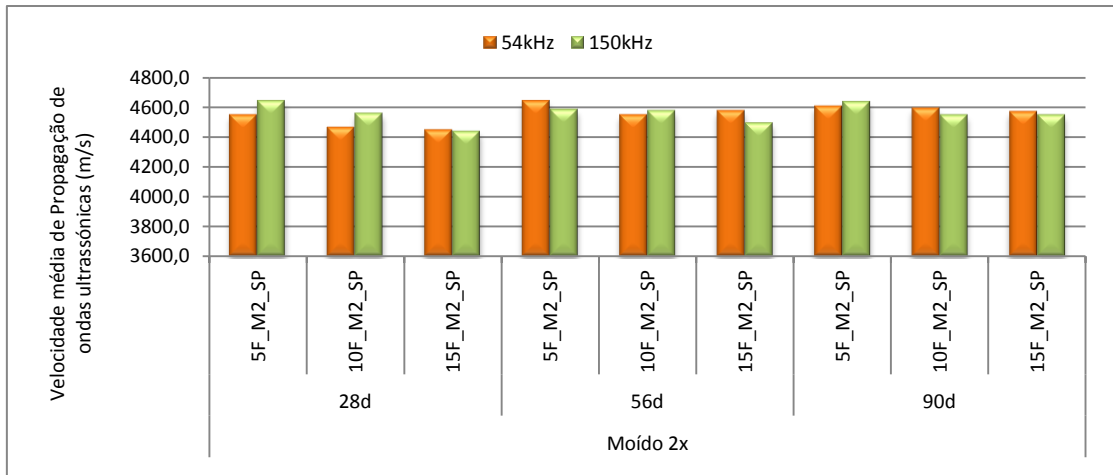
As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 ilustram a velocidade média de propagação das ondas ultrassónicas nas argamassas para os 28, 56 e 90 dias, comparando os valores obtidos com transdutores de 54kHz e 150 kHz, para a utilização de resíduo de FCC não moído, moído 1x e moído 2x, respectivamente.



**Figura 4.20** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta não moído-série teor de SP constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz.



**Figura 4.21** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassónicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta moído 1x-série teor de SP constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz.

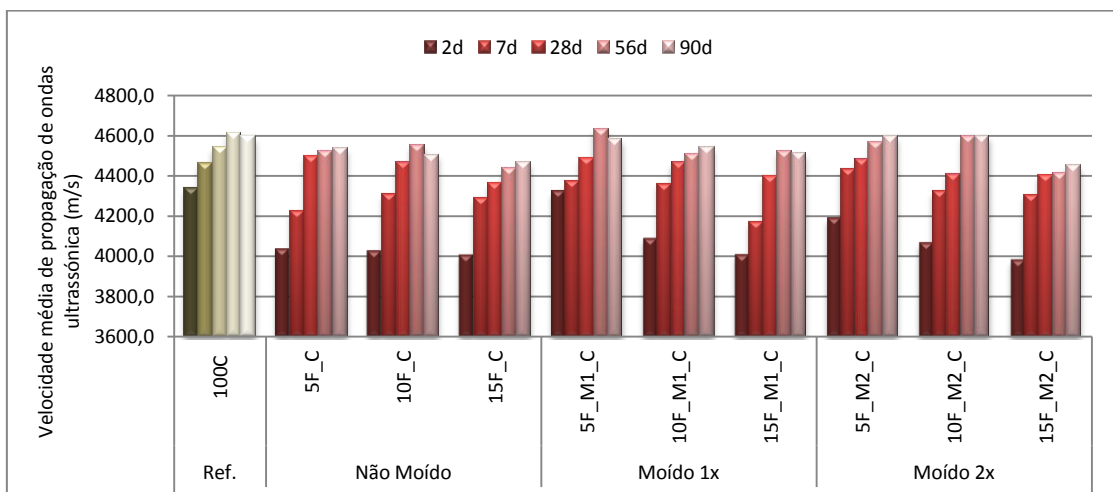


**Figura 4.22** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta moído 2x-série teor de SP constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz.

Pela observação das Figuras 4.20, 4.21 e 4.22, constata-se que os valores obtidos para as mesmas argamassas aos 28, 56 e 90 dias de hidratação utilizando diferentes transdutores apresentam valores semelhantes. Desta forma, os resultados obtidos nos diferentes transdutores não foram significativamente diferentes, verificando-se que esta alteração de transdutores não surtiu grande efeito na velocidade das ondas ultrassônicas. Porém, podem ter interesse na observação de outros fenômenos como a detecção de fissuras.

## II. Argamassas com consistência constante

A Figura 4.23 apresenta graficamente os resultados obtidos do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para as argamassas que constituem a série com consistência constante, para os transdutores de 54 kHz apresentados no Quadro 4.5.



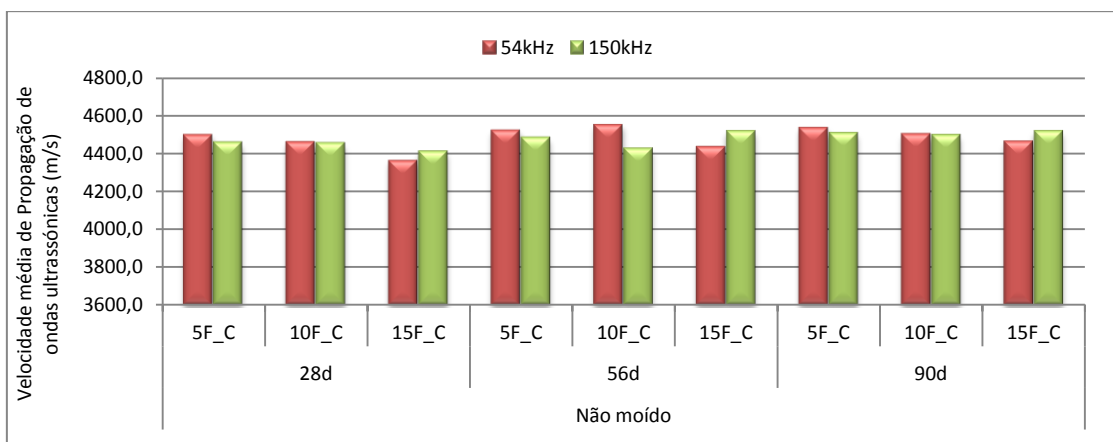
**Figura 4.23** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas para as argamassas da série consistência constante, utilizando transdutores de 54 kHz.

Através da análise da Figura 4.23 conclui-se que dos 2 para os 7 dias de hidratação as argamassas apresentam um aumento significativo da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. O aumento da velocidade verifica-se gradual em todas as argamassas até aos 56 dias de hidratação, após esta idade, a velocidade tende a estabilizar. Sendo que as argamassas 10F\_C e 5F\_M1\_C apresentam uma ligeira descida da velocidade aos 90 dias quando comparado com os 56 dias de cura, como já descrito para a série das argamassas com teor de SP constante, teoricamente este fenómeno não deveria de ocorrer, uma possível justificação para a diminuição da velocidade de propagação das ondas pode ser devido à ocorrência de fissuras no interior da amostra.

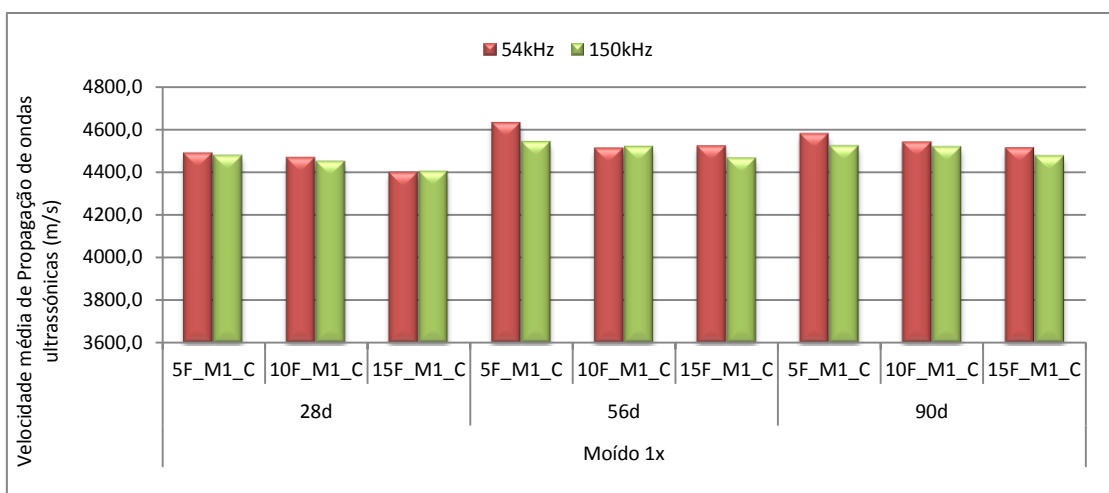
Analisando o gráfico em função da percentagem de incorporação de resíduo aos 90 dias de hidratação verifica-se que:

- Nas argamassas com 5% de substituição, a argamassa que revela melhores resultados é aquela em que o resíduo se encontra moído 2x;
- Quando a substituição parcial do cimento por resíduo de FCC ocorre para 10%, a argamassa 10F\_M2\_C é aquela que obtém melhores resultados da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.
- Nas argamassas com 15% de substituição, aquela que revela melhores resultados também apresenta resíduo moído na sua constituição, porém não é aquela em que a finura é menor, ou seja é a 15F\_M1\_C.

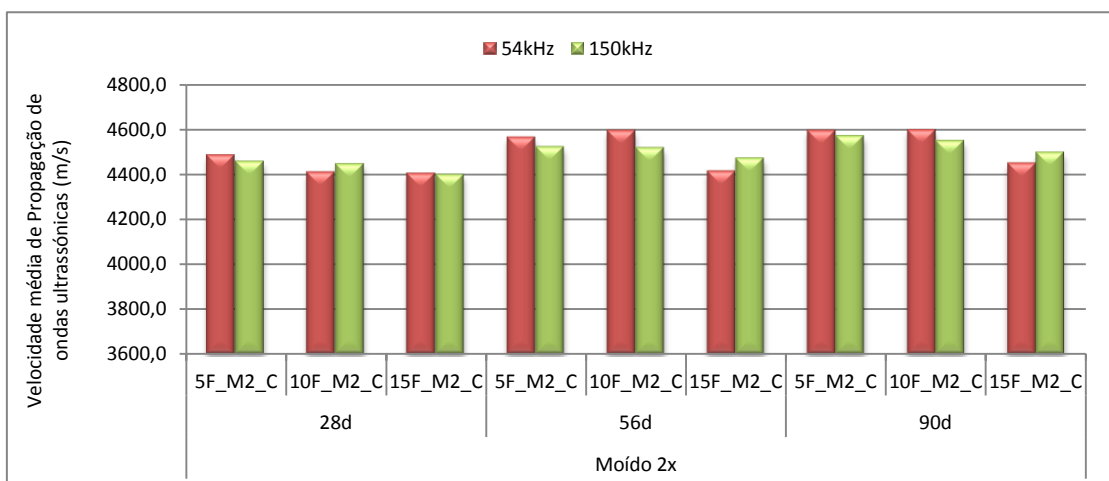
As Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 ilustram a velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas nas argamassas da série consistência constante, para os dois tipos de transdutores utilizados neste ensaio (54 kHz e 150 kHz) a partir dos 28 dias de hidratação.



**Figura 4.24** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta não moído-série consistência constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz.



**Figura 4.25** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta moído 1x-série consistência constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz.



**Figura 4.26** - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas para as argamassas cujo resíduo se apresenta moído 2x-série consistência constante -, utilizando transdutores de 54 kHz e 150 kHz.

Conclui-se pela análise das Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 que a alteração dos transdutores para a realização do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas não conduziu a uma alteração significativa na velocidade de propagação da onda, tal como acontece para a série teor de SP constante.

### III. Comparação genérica das duas séries:

Em ambas as séries a velocidade de ondas ultrassônicas aumenta à medida que a idade de hidratação aumenta, tendo tendência para estabilizar ao fim dos 56 dias de hidratação.

A diminuição da DTP mostrou-se pouco relevante nos resultados obtidos por este ensaio, isto é, os resultados de velocidade de ondas ultrassônicas obtidos para as argamassas que apresentavam resíduo de FCC submetido a um processo de moagem 1x e 2x foram

semelhantes àquelas que na sua constituição apresentam resíduo de FCC não moído. As argamassas mostraram a mesma tendência independentemente da série onde se inserem.

### 4.3.2 Resistência Mecânica

---

O conhecimento das resistências mecânicas constitui sempre um dado essencial na caracterização das argamassas no estado endurecido. O ensaio de resistência mecânica de argamassas compreende o ensaio de flexão e compressão. Neste trabalho estes ensaios têm como principal objetivo analisar a influência da diminuição da distribuição média do tamanho de partícula do resíduo de FCC quando substituto parcial do cimento bem como a influência da metodologia experimental adotada (apresentada na Secção 3.3.1) no comportamento das argamassas.

Teoricamente existe uma correlação entre os resultados de resistência mecânica e a velocidade de propagação de ultrassons porque associado ao aumento da resistência está tipicamente associada uma maior densidade da argamassa e consequentemente, maior velocidade de propagação das ondas (secção 4.3.1). Anteriormente constatou-se (secção 4.3.1) que a velocidade de propagação destas ondas se revelaram pouco sensíveis com a moagem do resíduo, contudo a análise da relação destas duas grandezas apresenta-se na subsecção 4.3.2.3.

A determinação dos valores de resistência à flexão e à compressão permite a determinação do coeficiente de ductilidade ( $R_f/R_c$ ), que se apresenta na Subsecção 4.3.2.3 – e do Índice de Atividade (IA) pozolânica [85], que se apresenta na Subsecção 4.3.2.4.

#### 4.3.2.1 Resistência à Flexão

O Quadro 4.6 apresenta os resultados obtidos de resistência à flexão para as diferentes séries estudadas consoante o tempo de hidratação, sendo estes valores representados graficamente nas Figuras 4.27 e 4.31. Os valores médios de tensão de rotura por flexão foram obtidos com base em 3 provetes por idade.

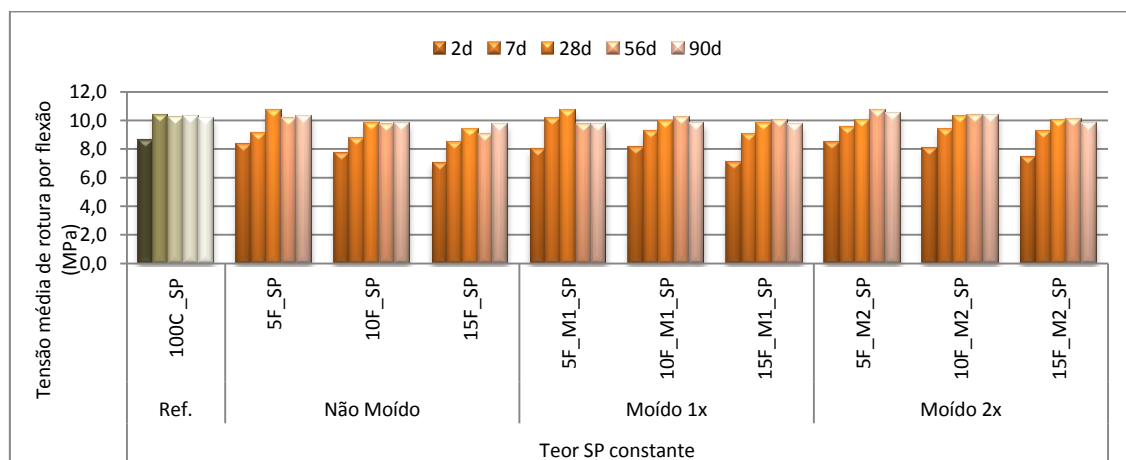
**Quadro 4.6-** Tensão média de rotura por flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas formuladas.

Série	Formulação	DIAS					
		2d	7d	28d	56d	90d	
Teor SP constante	Referência	100C_SP	8,7	10,4	10,2	10,3	10,2
	Não Moído	5F_SP	8,3	9,1	10,7	10,2	10,4
		10F_SP	7,7	8,8	9,8	9,7	9,8
		15F_SP	7,0	8,5	9,4	9,0	9,7
	Moído 1x	5F_M1_SP	8,0	10,2	10,7	9,7	9,7
		10F_M1_SP	8,1	9,2	9,9	10,3	9,8
		15F_M1_SP	7,1	9,1	9,8	10,0	9,7
	Moído 2x	5F_M2_SP	8,5	9,5	10,0	10,7	10,5
		10F_M2_SP	8,0	9,4	10,3	10,4	10,4
		15F_M2_SP	7,4	9,2	10,0	10,1	9,8
Consistência constante	Referência	100C	6,5	8,8	9,8	10,8	9,2
	Não Moído	5F_C	6,7	8,6	9,3	9,7	9,2
		10F_C	6,7	9,1	8,9	9,2	9,1
		15F_C	7,0	8,5	9,4	9,0	9,5
	Moído 1x	5F_M1_C	6,8	8,4	9,6	9,1	9,3
		10F_M1_C	6,8	9,1	9,5	9,3	9,9
		15F_M1_C	6,8	8,2	9,7	9,6	9,2
	Moído 2x	5F_M2_C	7,8	8,9	9,6	9,1	9,3
		10F_M2_C	7,0	9,0	9,8	9,4	9,5
		15F_M2_C	7,0	8,5	9,6	8,8	9,3

Numa primeira abordagem, através da observação do Quadro 4.6 verifica-se uma evolução considerável da resistência à flexão até aos 7 dias de cura, depois um aumento menos significativo da resistência à flexão até aos 28 dias e a partir desta idade uma tendência para a estabilização do valor.

**I. Argamassas com teor de SP constante**

A Figura 4.27 representa graficamente os resultados do ensaio de resistência à flexão apresentado no Quadro 4.6 para a série teor de SP constante.

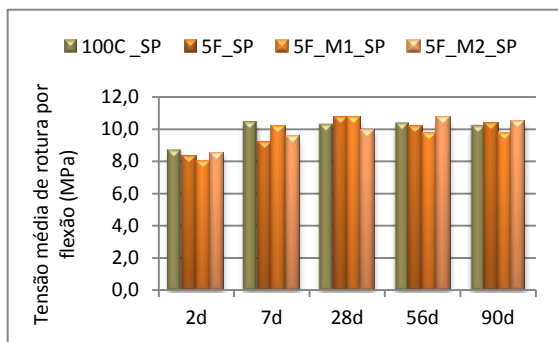


**Figura 4.27** - Tensão média de rotura por flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas que constituem a série com teor de SP constante.

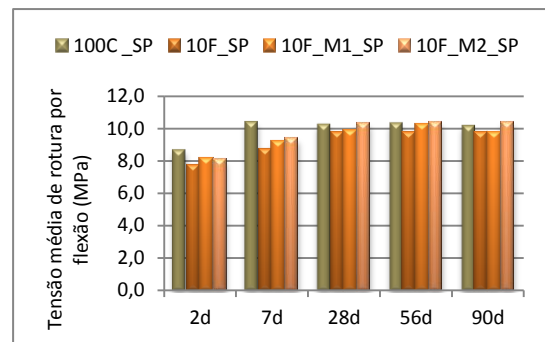
Segundo os resultados apresentados no Quadro 4.6 e ilustrados na Figura 4.27 observa-se que em todas as argamassas, a resistência à flexão apresenta uma evolução crescente até aos 28 dias de idade. A partir desta idade, as resistências tendem a manter-se constantes, uma vez que as oscilações ocorridas ao longo do tempo são praticamente todas inferiores ao erro deste ensaio. Quando comparadas com a argamassa de referência, as argamassas que apresentam resíduo na sua constituição exibem maior variabilidade no seu comportamento ao longo do tempo, uma vez que a partir dos 7 dias de hidratação a argamassa 100C\_SP mantêm o valor de resistência constante.

Através da observação do Quadro 4.6 constata-se que para uma substituição parcial de cimento por 10% e 15% de resíduo de FCC, só a argamassa 10F\_M2\_SP supera - aos 28 dias de hidratação - os valores de resistência à flexão obtidos para a argamassa de referência 100C\_SP.

De forma a clarificar a influência da DTP na resistência à flexão apresentam-se nas Figuras 4.28, 4.29 e 4.30 os apresentados na Figura 4.27 mas agora em função da percentagem de incorporação de resíduo de FCC.

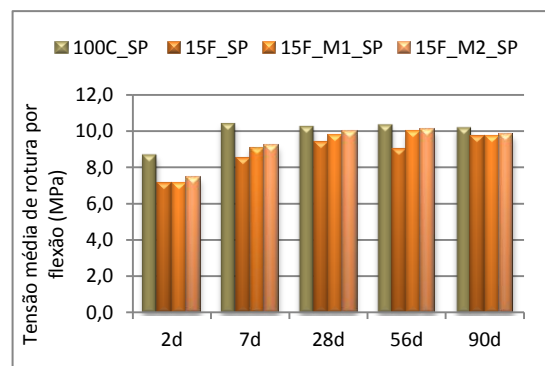


**Figura 4.28** - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 5%, na tensão média de rotura à flexão.



**Figura 4.29** - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 10%, na tensão média de rotura à flexão.

Analisando a Figura 4.28 verifica-se que a argamassa 5F\_SP apresenta valores muito próximos ao da argamassa de referência a partir dos 28 dias de idade. Adicionalmente, a argamassa 5F\_M2\_SP recupera os valores de resistência à flexão relativamente à argamassa de referência a partir dos 56 dias de idade. No que diz respeito à argamassa 5\_M1\_SP, exceto aos 28 dias de idade, esta apresenta sempre valores inferiores à



**Figura 4.30** - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 15%, na tensão média de rotura à flexão.

argamassa 100C\_SP.

Comparando os valores obtidos para os 5% e 10% (Figura 4.28 e 4.29) de substituição, apesar de com uma substituição de 5% se obter melhores valores de resistência à flexão, a substituição de cimento por 10% de resíduo também é satisfatória a partir dos 28 dias de hidratação para a argamassa 10F\_M2\_SP que apresenta sempre valores ligeiramente superiores quando comparada com a argamassa de referência. Adicionalmente, para os 10% de substituição verifica-se ainda que a argamassa que apresenta resíduo moído 2x revela melhores resultados de resistência a partir dos 7 dias de hidratação quando comparada com aquelas que contêm na sua constituição resíduo não moído e moído 1x.

No entanto, através da análise da Figura 4.30 verifica-se que o mesmo não acontece para uma substituição de 15%, em massa, de cimento por resíduo de FCC. Observa-se que, independentemente de DTP de resíduo de FCC, nenhuma das argamassas com 15% de substituição atinge os valores de resistência à flexão da argamassa de referência independentemente da idade de hidratação. A argamassa conducente a melhores valores para uma substituição de 15% de cimento por resíduo de FCC é a 15F\_M2\_SP. Note-se que, até aos 56 dias de hidratação as argamassas que contêm resíduo moído 1x e 2x apresentam sempre valores superiores àquelas que contêm resíduo não moído constatando-se, de facto, que a moagem confere resistência. No entanto, aos 90 dias a moagem é irrelevante, uma vez que todas as argamassas apresentam valores muito idênticos.

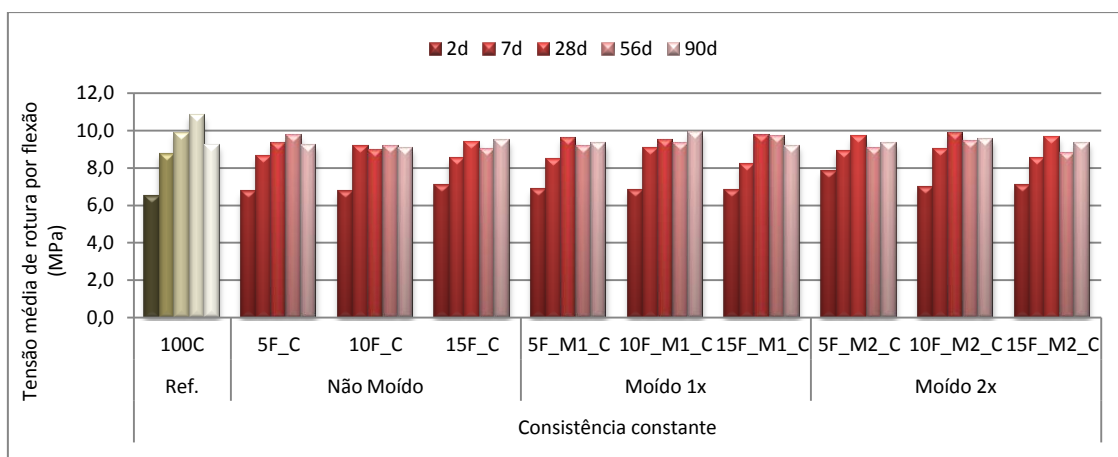
Os resultados obtidos relativamente à incorporação de resíduo de FCC encontram-se coerentes com os resultados obtidos em estudos realizados anteriormente, que verificaram que, para a incorporação de resíduo não moído, com o aumento da percentagem de incorporação de resíduo a resistência à flexão diminui independentemente da idade de cura [7, 8].

Adicionalmente, um estudo realizado anteriormente, no âmbito do projeto em que esta dissertação se insere, concluiu que para uma substituição de 5% de cimento por resíduo de FCC moído conduz a um ligeiro aumento da resistência à flexão para todas as idades de cura quando comparadas com a argamassa de referência [8], o que não está totalmente de acordo com os resultados obtidos, uma vez que tal acontecimento só ocorre a partir dos 28 dias de hidratação. No entanto, apesar do resíduo utilizado em estudo ser o mesmo que o utilizado nesta campanha experimental, tanto a areia utilizada como a quantidade de SP adicionado às argamassas foram diferentes.

No que diz respeito à moagem do resíduo, um outro estudo revelou que os valores da resistência à flexão apresentam um comportamento irregular, não podendo tirar conclusões da influência da moagem neste fator, sendo no entanto, os valores obtidos semelhantes aos obtidos pela argamassa de referência [3]. O referido estudo não se apresenta coerente com os resultados obtidos neste trabalho experimental, uma vez que para 10% de substituição a argamassa com resíduo moído 2x apresenta sempre valores superiores a partir do 7 dias de cura, quando comparada com as outras argamassas com resíduo.

## II. Argamassas com consistência constante

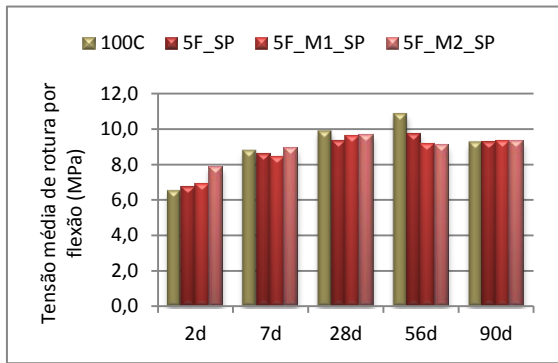
Na Figura 4.31 estão representados os valores médios de tensão de rotura por flexão apresentados no Quadro 4.6 para a série com consistência constante nas diferentes idades de hidratação.



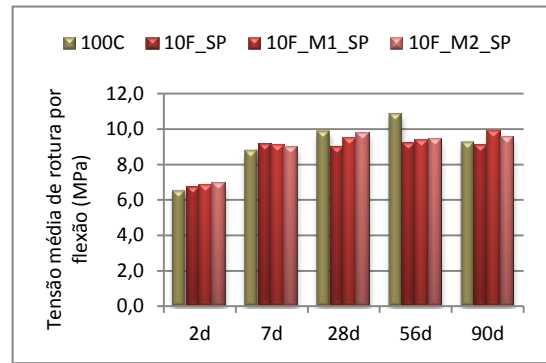
**Figura 4.31** - Tensão média de rotura por flexão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas que constituem a série com consistência constante.

Como se pode constatar através da análise da Figura 4.31, a resistência à flexão permanece praticamente constante para todas as argamassas formuladas a partir dos 28 dias de idade, sendo que estes valores se apresentam muito próximos da argamassa de referência, com exceção dos 28 dias de hidratação cuja argamassa 100C apresenta um valor ligeiramente superior.

As representações gráficas apresentadas nas Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 ilustram os dados representados na Figura 4.31 numa outra perspetiva. Nestas apresentam-se os dados por percentagem de incorporação de resíduo FCC de modo a clarificar a influência da moagem do resíduo incorporado no comportamento da argamassa.

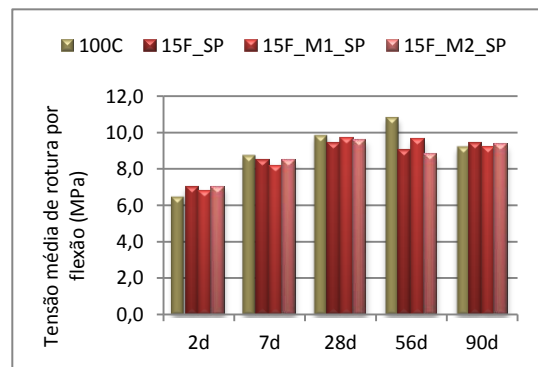


**Figura 4.32** - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de resíduo de FCC de 5% na tensão média de rotura à flexão.



**Figura 4.33** - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de resíduo de FCC de 10% na tensão média de rotura à flexão.

Da análise das Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 verifica-se que quando se mantém a trabalhabilidade da argamassa, a moagem do resíduo de FCC não apresenta uma influência significativa nas alterações dos resultados de resistência por flexão da argamassa das argamassas da série de consistência constante.



**Figura 4.34** -Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de resíduo de FCC de 15% na tensão média de rotura à flexão.

Retém-se pela observação destas figuras que,

independentemente da percentagem de substituição, aos 56 dias de hidratação a argamassa de referência apresentam valores significativamente superiores quando comparados com as argamassas que apresentam na sua constituição resíduo de FCC. Porém, note-se que aos 90 dias de hidratação todas as argamassas com incorporação de resíduo de FCC apresentam uma resistência à flexão igual ou superior à argamassa de referência, independentemente da percentagem de incorporação de resíduo.

Os resultados obtidos apresentam-se coerentes com o estudo já referido para a série anterior - excetuando os 56 dias de hidratação - ou seja, os resultados obtidos para a resistência à flexão se não apresentam alterações significativas obtendo-se valores semelhantes ao da argamassa de referência [3].

### III. Comparação genérica das duas séries:

Segundo a análise do Quadro 4.6 e das Figuras 4.27 e 4.31, verifica-se que em ambas as séries existe uma tendência para a estabilização dos valores a partir dos 28 dias de hidratação. A incorporação de resíduo de FCC na argamassa não traduz alterações significativas nos

resultados obtidos, isto é, tanto para 5% de substituição como para 15% os resultados obtidos para a resistência à flexão são semelhantes.

Adicionalmente, analisando o efeito da moagem do resíduo nesta propriedade, este revela-se significativo para substituições de 10% na série com teor de SP constante uma vez que as argamassas com resíduo moído 2x apresentaram melhores resultados de resistência. No entanto, para a série consistência constante a moagem revelou-se pouco significativa para todas as percentagens de substituição, uma vez que os resultados obtidos para as argamassas que apresentavam resíduo de FCC com menor DTP foram semelhantes aquelas que na sua constituição apresentam resíduo de FCC original.

#### 4.3.2.2 Resistência à Compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão obtidos nas argamassas em estudo com substituição parcial de cimento por resíduo de FCC com diferentes dimensões médias da partícula, bem como as respectivas argamassas de referência, apresentam-se no Quadro 4.7. Estes resultados estão representados nas Figuras 4.35 e 4.39 para as séries teor de SP constante e consistência constante, respetivamente.

**Quadro 4.7** - Tensão média de rotura por compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas formuladas.

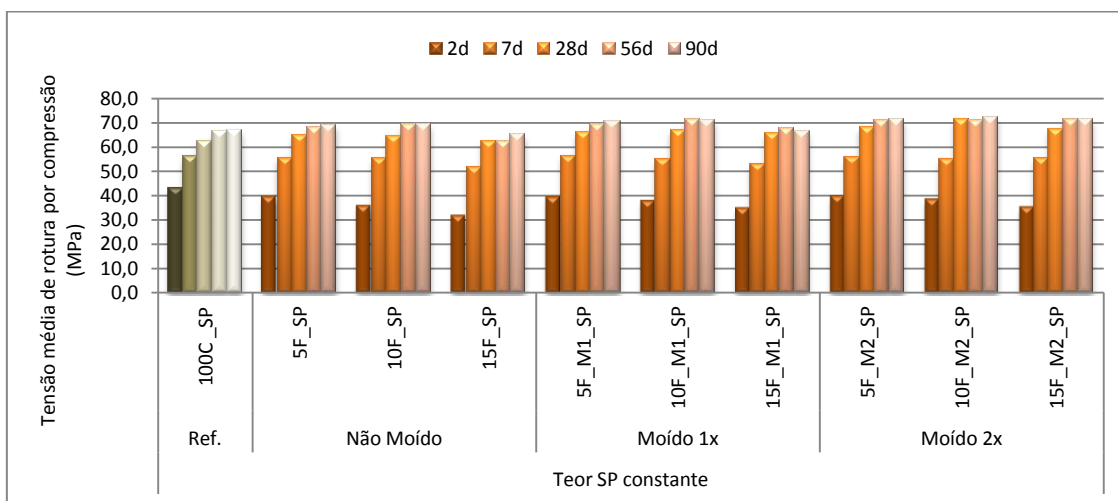
Série	Formulação	DIAS					
		2d	7d	28d	56d	90d	
Teor SP constante	Referência	100C_SP	43,0	56,3	62,6	66,6	66,9
	Não Moído	5F_SP	39,4	55,6	65,1	68,1	68,8
		10F_SP	35,6	55,4	64,7	69,3	69,2
		15F_SP	31,7	51,5	62,6	62,2	65,3
		100C_SP	43,0	56,3	62,6	66,6	66,9
	Moído 1x	5F_M1_SP	39,3	56,4	66,0	69,2	70,6
		10F_M1_SP	37,7	54,9	67,0	71,3	70,9
		15F_M1_SP	34,7	53,1	65,8	67,6	66,7
		100C_SP	43,0	56,3	62,6	66,6	66,9
	Moído 2x	5F_M2_SP	39,7	55,7	68,2	70,8	71,4
		10F_M2_SP	38,3	54,9	71,3	70,7	72,2
		15F_M2_SP	35,1	55,4	67,1	71,3	71,3
100C_SP		43,0	56,3	62,6	66,6	66,9	
Consistência constante	Referência	100C	33,1	47,2	59,6	63,8	59,5
	Não Moído	5F_C	29,6	45,0	57,4	60,7	61,4
		10F_C	30,2	49,5	58,5	62,4	63,4
		15F_C	31,7	51,5	62,6	62,2	65,3
		100C	33,1	47,2	59,6	63,8	59,5
	Moído 1x	5F_M1_C	31,5	47,0	60,4	63,0	62,6
		10F_M1_C	32,4	50,8	63,8	69,1	70,1
		15F_M1_C	31,7	52,1	63,5	68,1	68,6
		100C	33,1	47,2	59,6	63,8	59,5
	Moído 2x	5F_M2_C	32,7	48,8	61,1	64,9	62,8
		10F_M2_C	32,4	51,0	62,8	67,2	65,8
		15F_M2_C	31,8	51,7	64,9	68,4	69,4
100C		33,1	47,2	59,6	63,8	59,5	

De um modo geral, e observando os resultados apresentados no Quadro 4.7, as resistências à compressão aumentam ao longo do tempo de cura, sendo este aumento bastante acentuado dos dois para os sete dias de hidratação.

Da observação do Quadro 4.7 verifica-se que as argamassas pertencentes à série consistência constante apresentam valores mais baixos de resistência, nomeadamente a partir dos 28 dias de idade quando comparadas com a série teor de SP constante. Este resultado era expectável, uma vez que nas argamassas com teor de SP constante foram adicionadas quantidades de superplastificante superiores. Nesta perspetiva, de acordo com a ficha técnica do fabricante este contribui significativamente para o aumento das resistências. Desta forma, e comprovando o escrito a argamassa 100C\_SP apresenta sempre valores de resistência à compressão superiores à argamassa 100C (que não contém SP), pelo que se deve ter em atenção que as argamassas de referência para cada uma das séries estudadas apresentam valores de resistência à compressão diferentes.

#### I. Argamassas com teor de SP constante

Na Figura 4.35 encontram-se reproduzidos os resultados apresentados no Quadro 4.7 referentes ao ensaio de resistência à compressão para as argamassas que constituem a série com teor de SP constante.



**Figura 4.35** - Tensão média de rotura por compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas que constituem a série com teor de SP constante.

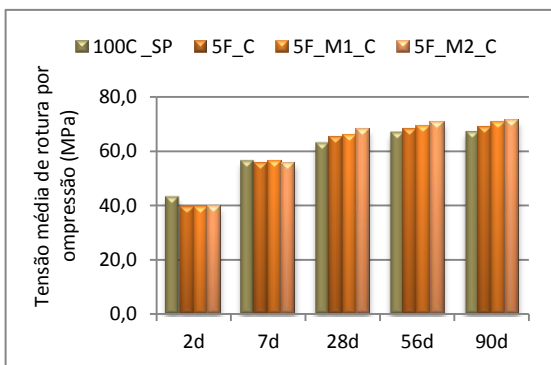
Como já observado através da análise do Quadro 4.6, torna-se evidente após a análise da representação gráfica da Figura 4.35 que a resistência à compressão aumenta significativamente dos dois para os sete dias de hidratação, independente da argamassa. Este

aumento verifica-se até aos 28 dias sendo que a partir desta idade os valores se mantêm praticamente constantes.

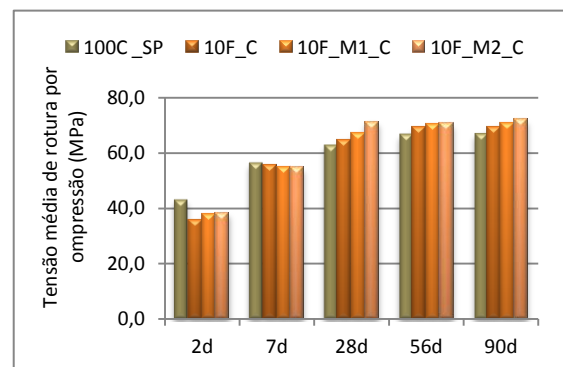
Verifica-se pela observação da Figura 4.35 que a introdução do resíduo de FCC não moído diminui ligeiramente a resistência à compressão das argamassas para substituições de 15%, em massa de cimento por resíduo de FCC, independentemente do tempo de hidratação.

A introdução de resíduo de FCC moído 2x traduz um aumento da resistência à compressão das argamassas em estudo a partir dos 28 dias de hidratação, contrariamente ao que acontece quando o resíduo presente na argamassa não se encontra moído. Também se constata através da representação gráfica que os melhores valores independentemente da percentagem de substituição se obtêm para as argamassas que apresentam resíduo moído 2x.

As Figuras 4.36, 4.37 e 4.38, reproduzem os dados representados na Figura 4.35 com o intuito de facilitar a comparação das alterações ocorridas pela diminuição, por moagem, das dimensões da partícula de resíduo de FCC. Estas figuras apresentam os resultados dos ensaios de resistência à compressão para 5, 10 e 15% de substituição.

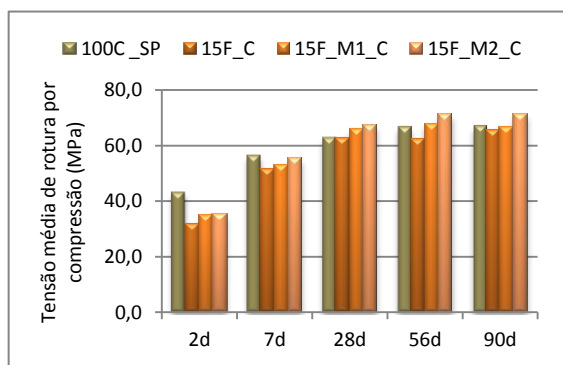


**Figura 4.36** - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 5% na tensão média de rotura à compressão.



**Figura 4.37** - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 10% na tensão média de rotura à compressão.

Através da análise da Figura 4.36, 4.37 e 4.38 observa-se que durante a primeira semana de hidratação as argamassas apresentam valores inferiores ao da argamassa de referência. Este comportamento deve-se à diminuição da quantidade de cimento presente na argamassa (cuja introdução de resíduo de FCC não compensa) que é responsável pela evolução precoce da



**Figura 4.38** - Influência da distribuição média da partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 15% na tensão média de rotura à compressão.

tensão. A partir dos 28 dias de idade todas as argamassas com 5% e 10% de substituição apresentam valores de resistência à compressão superiores à argamassa de referência, independentemente da DTP do resíduo.

Segundo a observação das Figuras 4.36 e 4.37, verifica-se que tanto para 5% como para 10% de incorporação de resíduo a argamassa conducente a melhores valores de resistência mecânica a partir dos 28 dias de hidratação é a argamassa que apresenta resíduo moído 2x, ou seja, 5\_M2\_SP para os 5% de substituição e 10\_M2\_SP para os 10% de substituição. No entanto, os resultados obtidos para as diferentes argamassas não são muito díspares, estas apresentam variações máximas de 2,6 MPa aos 90 dias para substituições de 5% e de 3 MPa para 10% de substituição.

Pela análise da Figura 4.37, que apresenta os valores obtidos para as resistências à compressão das argamassas com 15% de substituição de cimento por resíduo de FCC não moído e moído 1x e 2x, observa-se que a introdução de resíduo moído 2x nas argamassas para a referida percentagem de substituição conduz a um aumento de resistência à compressão. A argamassa 15F\_M2\_SP é a única que apresenta valores de resistências à compressão superiores aos obtidos pela argamassa de referência (100C\_SP). A argamassa que contém FCC moído 1x também apresenta valores de resistência à compressão sempre muito próximos dos da argamassa de referência. O mesmo não se observa para as argamassas cuja substituição parcial do cimento é feito com resíduo não moído.

Note-se que, independentemente da percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC, com a DTP a resistência à compressão aumenta a partir dos 28 dias, sendo que esta resistência das argamassas varia para todas as percentagens de substituição de cimento por resíduo de FCC da seguinte forma: FCC não moído < FCC moído 1x < FCC moído 2x.

Este comportamento era expectável e já comprovado com outros autores [8, 62], uma vez que a DTP, promove tipicamente uma aumento da atividade pozolânica e adicionalmente tem contributo para o efeito *filler*, ou seja, as partículas de menor dimensão preenchem os vazios existentes na estrutura e ocorre a diminuição da porosidade total tornando a matriz mais densa e desta forma mais resistente.

Como forma de analisar o efeito do resíduo de FCC quando este sofre um processo de moagem, um outro autor realizou um estudo com um resíduo de FCC oriundo do Brasil e constatou que se este resíduo só se atinge resultados de resistência à compressão superiores aos da argamassa de referência se se diminuir a gama da DTP deste resíduo, o que não se

verifica nesta dissertação, uma vez que as argamassas com resíduo não moído apresentam valores superiores à de referência para substituições em massa até 10%, a partir dos 28 dias de hidratação.

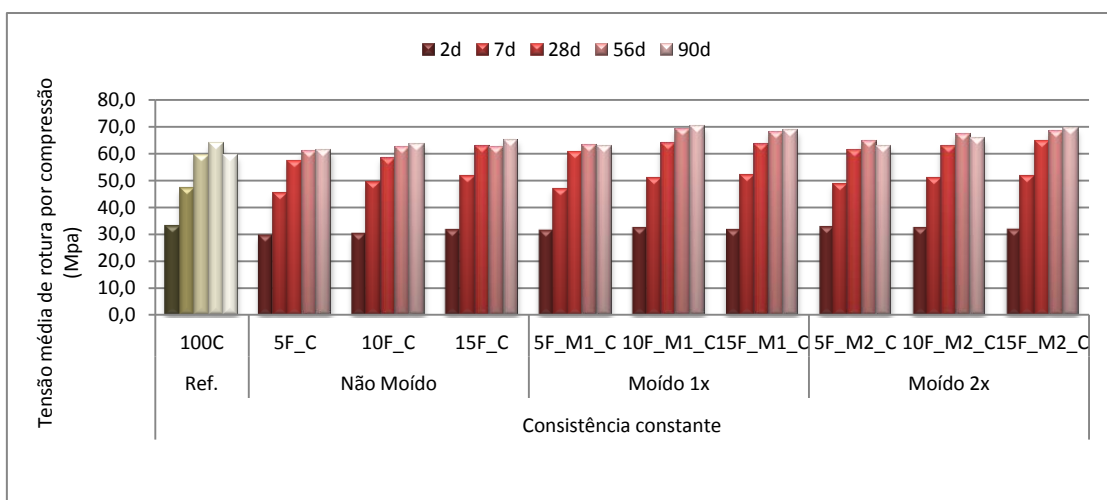
Os resultados observados estão coerentes com os resultados obtidos por outros autores em estudos realizados anteriormente que compararam a resistência à compressão para argamassas com resíduo de FCC de finuras diferentes, concluíram que a diminuição da dimensão média das partículas de FCC origina o aumento a resistência à compressão das argamassas para diferentes idades de cura [59, 62].

Uma substituição de 10% de cimento por resíduo de FCC com outro estudo realizado, onde se comprova que aos 7 dias de idade os valores obtidos na resistência à compressão estão muito próximos da argamassa de referência e a partir dos 28 dias de hidratação os resultados apresentam-se com um aumento de 5 MPa da resistência [59], no entanto há que ter em conta que o resíduo estudado por este autor não provém da mesma refinaria.

Como já descrito no Secção 2.4.3 as características do resíduo de FCC dependem do local da sua origem, e isto origina características mecânicas diferentes. Estudos realizados por outros autores com FCC não moído oriundo da Grécia e Brasil [86, 59], ocorre uma descida da resistência à compressão independentemente da percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC. Por outro lado, um estudo realizado na China [52] assume uma tendência igual aos resultados obtidos neste estudo: para os 5 % e 10% de substituição apresenta valores de resistência superior ao da argamassa de referência, sendo os 10 % o conducente a melhores resultados. Para 15% de substituição o valor obtido por este estudo apresenta-se inferior ao da argamassa de referência.

## **II. Argamassas com consistência constante:**

A Figura 4.39 representa os resultados médios de tensão de rotura à compressão (MPa) apresentados no Quadro 4.7, para a série com consistência constante nas diferentes idades de hidratação.

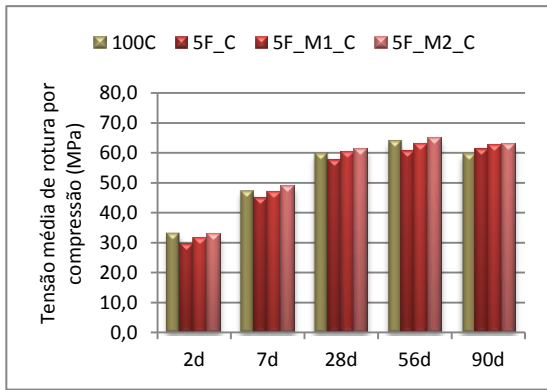


**Figura 4.39** - Tensão média de ruptura por compressão (MPa) avaliada em provetes prismáticos para as argamassas que constituem a série com consistência constante.

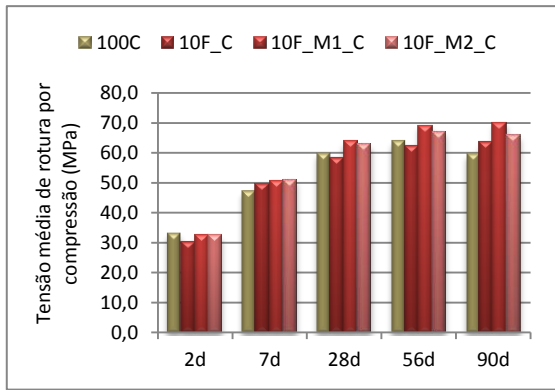
Da apreciação global da representação gráfica ilustrada na Figura 4.39 pode reter-se que as argamassas que apresentam na sua constituição resíduo de FCC apresentam valores muito semelhantes ou superiores ao da argamassa 100C. Substituições, em massa, de cimento por resíduo de FCC até 15% não traduzem diminuições na resistência mecânica da argamassa quando comparadas com as de referência aos 90 dias de hidratação. Adicionalmente, substituições de 10% e 15% de cimento por resíduo de FCC moído 1x e 2x revelam um aumento da resistência à compressão das argamassas quando comparadas com as de referência.

Segundo os resultados expostos no Quadro 4.6 e representados na Figura 4.39 verifica-se que a argamassa conducente a um melhor valor de resistência à compressão é a 10F\_M1\_C aos 90 dias de hidratação, comparativamente com a argamassa de referência esta apresenta um valor superior em 10,6 MPa.

De modo a facilitar a interpretação das alterações provocadas nas argamassas devido à introdução de resíduo de FCC com DTP menores são ilustradas nas Figuras 4.40, 4.41 e 4.42 as tensões médias de ruptura por compressão para as mesmas percentagens de incorporação de resíduo ao longo das idades de hidratação.

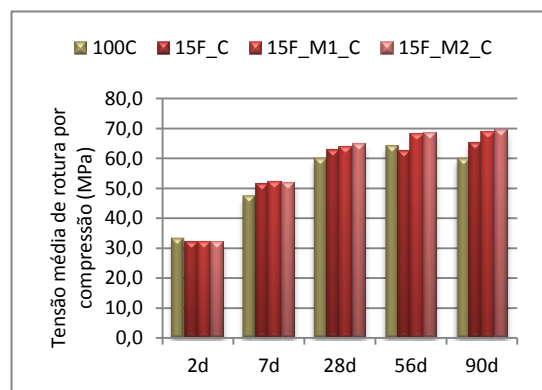


**Figura 4.40** - Influência da distribuição média do tamanho partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 5% na tensão média de rotura à compressão.



**Figura 4.41** - Influência da distribuição média do tamanho partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 10% na tensão média de rotura à compressão.

Observa-se pela análise da Figura 4.40 que somente a argamassa com resíduo moído 2x apresenta valores ligeiramente superiores ao da argamassa de referência a partir dos 7 dias de hidratação, constatando-se que a moagem do resíduo confere resistência à compressão à argamassa.



**Figura 4.42** - Influência da distribuição média do tamanho partícula para uma percentagem de incorporação de FCC de 15% na tensão média de rotura à compressão

No entanto, a partir dos 90 dias de hidratação as restantes argamassas recuperam e obtêm valores de resistência superior ao da argamassa de referência sendo irrelevante a moagem do resíduo para esta idade de cura.

Contrariamente ao que se verifica para substituições de 5% de cimento por resíduo de FCC em que somente aos 90 dias de hidratação todas as argamassas superam os resultados de referência, para substituições de 10% todas as argamassas a partir dos 7 dias de hidratação revelam valores iguais ou superiores à argamassa de referência, uma vez que a diminuição de resistência da argamassa 10F\_C que se constata com a análise da Figura 4.41 é inferior ao erro do ensaio, podendo desta forma assumir-se que não ocorre necessariamente uma diminuição da resistência. A argamassa onde se verificam melhores resultados para 10% de substituição a partir dos 28 dias de hidratação é a 10\_M1\_SP.

Uma substituição de 15% de cimento por resíduo de FCC (Figura 4.42) conduz a que todas as argamassas exibam uma resistência à compressão, a partir dos 7 dias de hidratação, superior à argamassa de referência (100C), ocorrendo somente uma ligeira descida, inferior ao próprio erro do ensaio, para a argamassa 15\_C aos 56 dias de hidratação.

Como acontece para uma substituição de 5% de cimento por FCC, também para 15% a argamassa que contém resíduo de FCC moído 2x apresenta melhores resultados, a partir dos 28 dias de hidratação, quando comparadas com as outras àquelas em que a finura do desse resíduo é menor.

Pela observação conjunta das Figuras 4.40, 4.41 e 4.42, conclui-se que à medida que se aumenta a percentagem (até, pelo menos 15%) de resíduo FCC a resistência das argamassas aumenta independentemente da DTP do resíduo introduzido na argamassa, aos 90 dias de hidratação. Adicionalmente, verifica-se ainda que, para a mesma argamassa, substituições em massa de 15% apresentam valores superiores de resistência à compressão quando comparadas com substituições de 5%.

Relativamente às argamassas com resíduo de FCC moído apresentarem melhores resultados, era expectável, tal como acontece para a série anterior a incorporação de partículas de menores dimensões além de exibirem boa atividade pozolânica, promovem, tipicamente, o efeito *filler* aumentando desta forma os valores de resistência à compressão.

### **III. Comparação genérica das duas séries:**

Após a análise efetuada anteriormente para as duas séries em estudo, revela-se que, para a série de SP constante, pode definir-se uma argamassa que apresenta melhores resultados para todas as percentagens de substituição analisadas, o que não acontece para a série consistência constante. Tipicamente, a tendência observada quando se diminui a distribuição do tamanho de partícula é igual para ambas as séries, isto é, as argamassas que apresentam na sua constituição resíduo de FCC submetido ao processo de moagem apresentam melhor resistência à compressão para todas as percentagens de substituição quando comparados com as argamassas em que o resíduo se apresenta não moído.

Quando se substitui 5% de cimento por resíduo de FCC a série teor de SP constante revela melhores resultados quando comparada com a série com consistência constante, uma vez que todas as argamassas apresentam valores superiores ao da argamassa de referência (100C\_SP). Sendo que nas argamassas de consistência constante este fenómeno só ocorre aos 90 dias.

O Quadro 4.8 evidencia os valores obtidos na resistência à compressão para as argamassas em estudo tendo em conta os limites impostos pela norma NP EN 197-1 [25].

**Quadro 4.8** - Quadro-resumo dos valores da resistência à compressão para as argamassas em estudo e verificação dos requisitos mecânicos impostos pela norma NP EN 197-1.

Série	Formulação	DIAS					
		2d	7d	28d	56d	90d	
Requisitos NP EN 197-1		Rc ≥ 20,0	-	42,5 ≤ Rc ≤ 62,5	-	-	
Teor SP constante	Referência	100C_SP	43,0	56,3	62,6	66,6	66,9
	Não Moído	5F_SP	39,4	55,6	65,1	68,1	68,8
		10F_SP	35,6	55,4	64,7	69,3	69,2
		15F_SP	31,7	51,5	62,6	62,2	65,3
		5F_M1_SP	39,3	56,4	66,0	69,2	70,6
	Moído 1x	10F_M1_SP	37,7	54,9	67,0	71,3	70,9
		15F_M1_SP	34,7	53,1	65,8	67,6	66,7
		5F_M2_SP	39,7	55,7	68,2	70,8	71,4
	Moído 2x	10F_M2_SP	38,3	54,9	71,3	70,7	72,2
		15F_M2_SP	35,1	55,4	67,1	71,3	71,3
		Referência	100C	33,1	47,2	59,6	63,8
	Consistência constante	Não Moído	5F_C	29,6	45,0	57,4	60,7
10F_C			30,2	49,5	58,5	62,4	63,4
15F_C			31,7	51,5	62,6	62,2	65,3
Moído 1x		5F_M1_C	31,5	47,0	60,4	63,0	62,6
		10F_M1_C	32,4	50,8	63,8	69,1	70,1
		15F_M1_C	31,7	52,1	63,5	68,1	68,6
Moído 2x		5F_M2_C	32,7	48,8	61,1	64,9	62,8
		10F_M2_C	32,4	51,0	62,8	67,2	65,8
		15F_M2_C	31,8	51,7	64,9	68,4	69,4

Os valores apresentados a **vermelho** são aqueles que excedem o limite máximo imposto pela norma NP EN 197-1 aos 28 dias de hidratação.

Através da análise dos resultados presentes no Quadro 4.8, referentes à resistência à compressão, que têm como objetivo a verificação do cumprimento dos limites impostos pela norma NP EN 197-1 [25], verifica-se que aos 2 dias de hidratação todas as argamassas em estudo apresentam valores superiores ao imposto por esta norma.

Em contrapartida, aos 28 dias de hidratação, para argamassas que constituem a série com teor de SP constante observa-se que todos os valores obtidos excedem o limite superior admitido pela norma – 62,5 MPa. Note-se que, a própria argamassa de referência formulada para esta série revela um valor ligeiramente superior ao máximo admitido o que se justifica pelo facto de se ter adicionado superplastificante à argamassa. Desta forma era expectável, devido não só à quantidade de SP adicionado como ao efeito pozolânico e *filler*, que as restantes argamassas formuladas adquirissem resistências superiores e ultrapassassem o limite imposto na norma NP EN 197-1 [25]. Este limite é ultrapassado no máximo, em 8,8 MPa.

Segundo a observação dos resultados obtidos para as argamassas com consistência constante, revela-se que o limite máximo só é ligeiramente excedido (máximo de 2,4 MPa) para as argamassas com substituições de 10% e 15% e que apresentam resíduo moído 1x e 2x.

Devido à obtenção de elevadas resistências à compressão para estas argamassas não significa que os resultados sejam negativos, isto é, passam a fazer parte de uma classe de resistência de 52,5R em vez de 42,5R.

#### 4.3.2.3 Ductilidade (Rf/Rc) e Relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e resistência à compressão

O coeficiente de ductilidade transmite a capacidade da argamassa se deformar consoante as solicitações mecânicas a que está sujeita.

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas é normalmente correlacionado com o ensaio de resistência à compressão. Esta correlação é evidente uma vez que, com a diminuição de vazios ao longo do tempo, dá-se um aumento da resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas depende das características do material que atravessa, nomeadamente a presença de vazios e fissuras diminuem a sua velocidade.

Devido à extensa análise de resultados, os gráficos referentes ao coeficiente de ductilidade e relação entre velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e resistências à compressão apresentam-se no Anexo E.2 e E.3, respectivamente.

##### I. Argamassas com teor de SP constante:

O Quadro 4.9 apresenta os valores do coeficiente de ductilidade ao longo do tempo de cura e a relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e resistência à compressão para as argamassas que constituem a série teor de SP constante.

**Quadro 4.9** - Relação entre as resistências mecânicas (Rf/Rc) avaliadas ao longo do tempo de cura e Relação entre Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e resistência à compressão por idade de cura para as argamassas com teor de SP constante.

Família	Formulação	Coeficiente de Ductilidade (Rf/Rc)					Relação entre Velocidade ultrassons e Rc	
		2d	7d	28d	56d	90d	R <sup>2</sup>	
Teor SP constante	Referência	100C_SP	0,20	0,18	0,16	0,15	0,15	0,92
	Não Moído	5F_SP	0,21	0,16	0,16	0,15	0,15	0,98
		10F_SP	0,22	0,16	0,15	0,14	0,14	0,95
		15F_SP	0,22	0,16	0,15	0,15	0,15	0,97
		5F_M1_SP	0,20	0,18	0,16	0,14	0,14	0,96
	Moído 1x	10F_M1_SP	0,22	0,17	0,15	0,14	0,14	0,86
		15F_M1_SP	0,20	0,17	0,15	0,15	0,15	0,97
		5F_M2_SP	0,21	0,17	0,15	0,15	0,15	0,96
	Moído 2x	10F_M2_SP	0,21	0,17	0,14	0,15	0,15	0,97
		15F_M2_SP	0,21	0,17	0,15	0,14	0,14	0,95

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

De uma forma geral, as argamassas apresentam a tendência para diminuir a sua ductilidade ao longo do tempo sendo esta descida mais acentuada dos 2 para os 7 dias de hidratação. A partir dos 28 dias este coeficiente tem tendência a atenuar a descida mantendo-se constante a partir dos 56 dias de idade. Estes baixos valores de ductilidade já eram esperados uma vez que o valor da resistência à flexão é muito inferior ao da compressão.

Os resultados apontam para ductilidades bastante próximas entre as diferentes argamassas, o que era esperado, uma vez que as diferenças de valores das resistências mecânicas entre as argamassas são muito ténues.

Por outro lado, a relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e a resistência à compressão foi expresso por uma função linear, sendo o fator de correlação bastante elevado ( $R^2 \approx 1$ ) para todas as argamassas, à exceção da argamassa 10\_M1\_SP que apresenta um valor moderado ( $R^2=0,86$ ). Comprova-se neste caso o expectável, ocorre uma densificação da matriz de cimento ao longo do tempo. Conclui-se, pelas correlações obtidas, que a resistência à compressão pode ser avaliada pelo ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas.

## II. Argamassas com consistência constante:

O Quadro 4.10 apresenta o coeficiente de ductilidade consoante o tempo de hidratação para as diferentes argamassas que constituem a série consistência constante e a relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e a resistência por compressão.

**Quadro 4.10** - Relação entre as resistências mecânicas (Rf/Rc) avaliadas ao longo do tempo de cura e Relação entre Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e resistência à compressão por idade de cura para as argamassas consistência constante.

Família	Formulação	Coeficiente de Ductilidade (Rf/Rc)					Relação entre Velocidade ultrassons e Rc	
		2d	7d	28d	56d	90d	R <sup>2</sup>	
Consistência constante	Referência	100C	0,20	0,19	0,17	0,17	0,15	0,97
	Não Moído	5F_C	0,23	0,19	0,16	0,16	0,15	0,99
		10F_C	0,22	0,18	0,15	0,15	0,14	0,99
		15F_C	0,22	0,16	0,15	0,15	0,14	0,97
		5F_M1_C	0,22	0,18	0,16	0,15	0,15	0,84
	Moído 1x	10F_M1_C	0,21	0,18	0,15	0,14	0,14	0,98
		15F_M1_C	0,21	0,16	0,15	0,14	0,13	0,95
		5F_M2_C	0,24	0,18	0,16	0,14	0,15	0,94
	Moído 2x	10F_M2_C	0,21	0,18	0,16	0,14	0,14	0,94
		15F_M2_C	0,22	0,16	0,15	0,13	0,13	0,96

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

Analisando os resultados obtidos para o coeficiente de ductilidade, tal como na série teor de SP constante, dos 2 para os 7 dias de hidratação ocorre uma descida acentuada da ductilidade.

Porém a partir dos 28 dias o valor apresenta uma tendência para a estabilização apresentando a partir destas idades valores iguais ou muito semelhantes.

Relativamente aos resultados de velocidades de propagação de ondas ultrassônicas e resistência à compressão verifica-se que a correlação existente é boa ( $R^2 \approx 1$ ), verificando-se a tendência de as argamassas com maiores resistências à compressão apresentarem uma maior velocidade de ultrassons. Adicionalmente, conclui-se, tal como para a série anterior, que o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pode ser utilizado para avaliar a resistência à compressão das argamassas.

#### 4.3.2.4 Índice de Atividade pozolânica

Como forma de avaliar a atividade pozolânica das argamassas em estudo precedeu-se à determinação do Índice de Atividade pozolânica (IA). Segundo a norma americana ASTM C311 [85], o IA é obtido através da divisão do valor da resistência à compressão para uma argamassa com 20% de substituição, aos 28 dias de hidratação e a resistência à compressão da argamassa considerada de referência para a mesma idade.

No presente trabalho, adotou-se um processo alternativo: considerou-se o índice de atividade pozolânica como sendo a razão entre a resistência à compressão da argamassa, para uma dada percentagem de substituição e idade e a resistência à compressão da respetiva argamassa de referência, para cada idade de cura. Este é dado pela seguinte expressão:

$$IA = \frac{A}{B} \times 100$$

Em que,

IA – Índice de Atividade pozolânica

A – Valor médio da resistência à compressão da argamassa para uma determinada percentagem de substituição e idade de cura

B – Valor médio da resistência à compressão da argamassa de referência para a mesma idade de cura de A.

##### I. Argamassas com teor de SP constante:

No Quadros 4.11 apresentam-se os valores obtidos para o índice de atividade pozolânica para a série teor de SP constante.

**Quadro 4.11** -Índice de atividade pozolânica para as argamassas que constituem a série teor de SP constante.

Série	Formulação	DIAS					
		2d	7d	28d	56d	90d	
Teor SP constante	Referência	100C_SP	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Não Moído	5F_SP	91,5	98,9	103,9	102,3	102,8
		10F_SP	82,8	98,5	103,3	104,1	103,4
		15F_SP	73,6	91,5	100,0	93,4	97,7
	Moído 1x	5F_M1_SP	91,3	100,2	105,4	103,9	105,6
		10F_M1_SP	87,7	97,6	107,0	107,0	106,0
		15F_M1_SP	80,6	94,4	105,1	101,6	99,7
	Moído 2x	5F_M2_SP	92,3	99,1	108,8	106,4	106,8
		10F_M2_SP	89,1	97,6	113,9	106,3	108,0
		15F_M2_SP	81,6	98,5	107,2	107,0	106,5

Nota: Os valores apresentados a vermelho são aqueles cujo efeito de diluição foi superado

A substituição parcial de cimento por outro material não reativo – efeito de diluição - deveria traduzir-se na diminuição da resistência à compressão das argamassas proporcional à quantidade de substituição que ocorresse. Contudo, isto pode não se verificar se o material apresentar atividade pozolânica ou se as partículas do material de substituição forem inferiores à dos materiais de cimento preenchendo a curva granulométrica dos sólidos presentes nestes materiais, designando-se correntemente de *filleres*. Tipicamente, o efeito *filler* é tanto mais significativo quanto menor for a dimensão das partículas do material incorporado – neste caso resíduo de FCC.

Neste trabalho foram estudadas três finuras de resíduo de FCC (Figura 3.3), em que nas argamassas que apresentam resíduo não moído as partículas deste têm dimensões superiores às do cimento, e neste caso o efeito *filler* é desprezado. Contudo, este resíduo apresenta atividade pozolânica e por isso observa-se pela análise do Quadro 4.11, a partir dos 7 dias de hidratação, para substituições de 5%, 10% e 15% que o Índice de Atividade pozolânica (IA) traduz valores superiores aos expectáveis pelo efeito de diluição. No caso das argamassas que apresentam resíduo moído 1x e 2x, além da atividade pozolânica que o resíduo apresenta pode ainda ser considerado o efeito *filler* do resíduo, uma vez que as suas partículas apresentam dimensões inferiores às do cimento. Segundo a análise do Quadro 4.11 verifica-se que também a partir dos 28 dias de hidratação todas as argamassas que contêm resíduo apresentam IA superior à argamassa de referência, sendo que os melhores valores se verificam para aquelas em que o resíduo foi moído 2x indo ao encontro do anteriormente descrito – quanto menor a dimensão das partículas do material incorporado, mais significativo é o efeito *filler*.

Segundo os resultados apresentados no Quadro 4.11, observa-se a vermelho os resultados cujo efeito de diluição foi superado. Verifica-se que todas as argamassas, com exceção da 15F\_SP, apresentam a partir dos 28 dias valores de IA superiores à argamassa de referência.

Conclui-se pela análise do Quadro 4.11 que os melhores valores de IA obtêm-se para os 10% de substituição, em massa, de cimento por resíduo de FCC. Adicionalmente, quando comparados o efeito de diminuição de DTP, o resíduo moído 2x é o que revela melhores resultados, independentemente da percentagem de substituição. Os resultados obtidos apresentam-se coerentes com outros estudos, que observaram que a diminuição da distribuição média da partícula aumenta o Índice de Atividade pozolânica da argamassa [8, 6, 57, 76, 62].

## II. Argamassas com consistência constante:

No Quadro 4.12 visualizam-se os resultados obtidos para o Índice de Atividade pozolânica para a série consistência constante.

**Quadro 4.12** - Índice de Atividade pozolânica para as argamassas que constituem a série consistência constante.

Série	Formulação	DIAS					
		2d	7d	28d	56d	90d	
Consistência constante	Referência	100C	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Não Moído	5F_C	89,3	95,4	96,2	95,3	103,2
		10F_C	91,2	104,9	98,2	97,9	106,7
		15F_C	95,6	109,1	105,0	97,5	109,8
	Moído 1x	5F_M1_C	95,0	99,6	101,3	98,9	105,3
		10F_M1_C	97,8	107,7	106,9	108,3	117,9
		15F_M1_C	95,6	110,4	106,6	106,9	115,4
	Moído 2x	5F_M2_C	98,7	103,3	102,5	101,8	105,6
		10F_M2_C	97,8	108,2	105,3	105,4	110,7
		15F_M2_C	95,9	109,5	108,8	107,4	116,6

Nota: Os valores apresentados a vermelho são aqueles cujo efeito de diluição foi superado

Em conformidade com o descrito na série anterior, também nesta série se verifica a atividade pozolânica do resíduo em estudo, bem como o seu efeito *filler* quando este é submetido ao processo de moagem.

Os resultados apresentados a vermelho no Quadro 4.12 são aqueles cujo efeito de diluição foi superado, constata-se que logo na primeira idade de cura (2d), com exceção da argamassa 5F\_C, todas superam o efeito de diluição. Adicionalmente verifica-se pela análise deste Quadro que os valores mais elevados de IA ocorrem para os 15% de substituição quando as argamassas apresentam resíduo não moído e moído 2x. No caso das argamassas formuladas

que contêm na sua constituição resíduo moído 1x os valores mais elevados de IA verificam-se, tipicamente, para substituições de 10%.

A argamassa desta série conducente a melhores valores de Índice de Atividade pozolânica foi a 10F\_M1\_C. Os resultados obtidos apresentam-se coerentes com outros estudos que concluem que a diminuição da distribuição média da partícula aumenta o Índice de Atividade pozolânica da argamassa [8, 6, 57, 76, 62]. Uma vez que, as argamassas que apresentam na sua constituição resíduo não moído só superam – para todas as percentagens de substituição – os valores da argamassa de referência aos 90 dias de hidratação.

### **III. Comparação genérica das duas séries:**

Analisando somente os valores de IA para os 90 dias de hidratação apresentados nos Quadros 4.11 e 4.12 para as séries de teor de SP constante e consistência constante, respetivamente, conclui-se que as argamassas que apresentam consistência constante obtêm resultados superiores. No entanto, deve ter-se em conta que as argamassas de referência das duas séries são distintas, uma vez que argamassa 100C\_SP – pertencente à série teor de SP constante – apresenta melhores valores de resistência à compressão devido à introdução de SP e daí estas diferenças nos valores de IA nas séries. De facto, a série consistência constante apresenta melhores resultados, isto é, quando comparadas a mesma argamassa, mas de séries diferentes, os valores também são notoriamente superiores quando a consistência da argamassa se mantém constante. Na argamassa 15F\_M1\_SP o valor apesar de muito próximo é inferior (97,7%) ao da argamassa de referência (100%), por outro lado, comparando a mesma argamassa mas com consistência constante – 15F\_M1\_C – esta apresenta um valor de Índice de Atividade pozolânica de 115,4% (15,4% superior quando comparada com a de referência), e no entanto aquela que contém um teor de SP constante apresenta uma resistência à compressão superior quando comparada com a de consistência constante.

As tendências não se mantêm constantes para as duas séries em estudo, enquanto para a série de argamassas com teor de SP constante os melhores valores ocorrem, independentemente da moagem do resíduo, para os 10% de substituição, para as argamassas que apresentam consistência constante, os melhores resultados obtêm-se, dependendo da moagem do resíduo, para os 10% (moído 1x) ou 15% (não moído e moído 2x) de substituição.

### 4.3.3 Aderência – Arrancamento por tração

O ensaio de arrancamento por tração tem como objetivo avaliar a tensão de aderência da argamassa ao suporte. A tensão de aderência é uma das principais propriedades exigidas numa argamassa de revestimento, sendo definida como a força máxima de rotura por unidade de superfície, que pode ser medida com a aplicação de uma força de tração ou de corte [87].

Como forma de complementar este estudo foi adicionalmente realizado este ensaio com camada de chapisco para as argamassas cujo resíduo de FCC não se encontrava moído.

Na Figura 4.43 estão reproduzidos os resultados apresentados no Quadro 4.13 referentes ao ensaio de aderência para as argamassas em estudo.

A recta a vermelho apresentada nas representações gráficas seguintes indica o limite mínimo admitido para a aderência na norma francesa NF P 15-201 [87] e na norma Brasileira NBR 13749/96 [88].

**Quadro 4.13** – Tensão de aderência – Arrancamento por tração (N/mm<sup>2</sup>) e zonas de rotura obtidas para as argamassas em estudo.

Família	Formulação	Aderência (N/mm <sup>2</sup> )	Aderência Camada Chapisco (N/mm <sup>2</sup> )	Zona predominante de rotura		
					C/ Chapisco	
Teor SP constante	Referência	100C_SP	0,6	Parcialmente Coesivo		
	Não Moído	5F_SP	0,3	0,4	Adesivo	Adesivo
		10F_SP	0,3	0,3	Adesivo	Adesivo
		15F_SP*	0,2	0,3	Adesivo	Adesivo
		5F_M1_SP	0,4		Parcialmente Coesivo	
	Moído 1x	10F_M1_SP	0,3		Adesivo	
		15F_M1_SP	0,4		Adesivo	
		5F_M2_SP	0,4		Adesivo	
	Moído 2x	10F_M2_SP	0,4		Adesivo	
		15F_M2_SP	0,4		Adesivo	
		Referência	100C	0,3	Coesivo	
	Consistência constante	Não Moído	5F_C	0,5	0,4	Adesivo
10F_C			0,4	0,4	Adesivo	Adesivo
15F_C*			0,2	0,3	Adesivo	Adesivo
Moído 1x		5F_M1_C	0,4		Parcialmente Coesivo	
		10F_M1_C	0,3		Adesivo	
		15F_M1_C	0,3		Adesivo	
Moído 2x		5F_M2_C	0,5		Coesivo	
		10F_M2_C	0,2		Adesivo	
		15F_M2_C	0,3		Adesivo	

15F\_C\* e 15F\_SP\* correspondem à mesma composição de argamassa (como explicado no subcapítulo 4.1). Contudo, como os resultados obtidos com esta argamassa podem ser comparados com os resultados das outras argamassas de cada uma das "famílias" preparadas, assumiu-se designações distintas quando se pretendeu comparar com cada uma das famílias

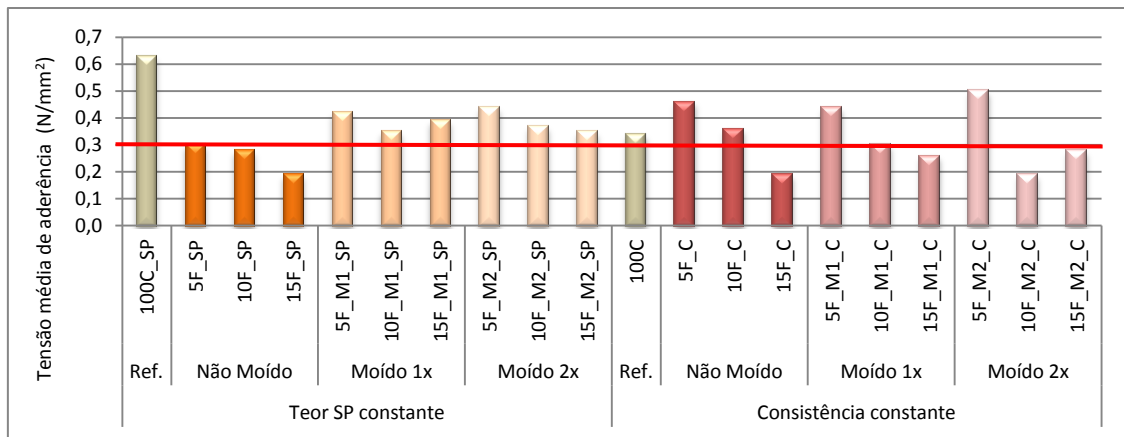


Figura 4.43 – Tensão média de aderência (N/mm<sup>2</sup>) para as diferentes séries das argamassas em estudo.

Pela análise das diferentes argamassas que servem de referência a cada uma das séries presentes observa-se que a introdução de superplastificante melhora significativamente a aderência das argamassas, obtendo-se um aumento na aderência de 0,3 N/mm<sup>2</sup> na argamassa 100C\_SP em relação à 100C.

Os resultados obtidos revelam que existe, tipicamente, uma tendência para a diminuição da aderência com o aumento do teor de incorporação de resíduo de FCC, independentemente da dimensão média da partícula. No entanto, a argamassa 10\_F\_M2\_C apresenta um valor atípico quando comparada com todas as outras argamassas, uma vez que para uma percentagem de incorporação de 10% o valor é inferior quando realizado o mesmo ensaio mas com uma incorporação de 15%.

Os resultados obtidos neste ensaio estão normalmente associados a uma margem de erro significativa: i) forma de colagem das pastilhas pode influenciar nos valores; ii) compactação exercida aquando a aplicação da argamassa no suporte; iii) humedecimento da superfície de contacto. Adicionalmente, para a mesma argamassa, verificou-se uma grande dispersão dos resultados de aderência obtidos – os resultados obtidos das seis “pastilhas” (subsecção 3.4.6.5) –, o que levanta algumas incertezas nos resultados obtidos da realização deste ensaio.

A norma EN 1015-12 [67] não define valores mínimos de aderência para as argamassas, desta forma, são normalmente adotados como limites mínimos os valores indicados pela norma francesa NF P 15-201 [87] de acordo com a qual o valor médio do ensaio de arrancamento deve ser superior a 0,3 N/mm<sup>2</sup>, e nenhuma das determinações individuais deve ter resistência inferior a 0,2 N/mm<sup>2</sup>. Os mesmos valores são recomendados pela norma brasileira NBR 13749/96 [88].

Estudos realizados por outros autores concluíram que avaliar a aderência aos 28 dias de idade pode ser demasiado conservativo. Uma vez que verificaram que a aderência tem uma evolução significativa dos 28 para os 91 dias de idade. Assim, estes recomendam que a aderência deve efetuada aos 56 e 91 dias de idade [88].

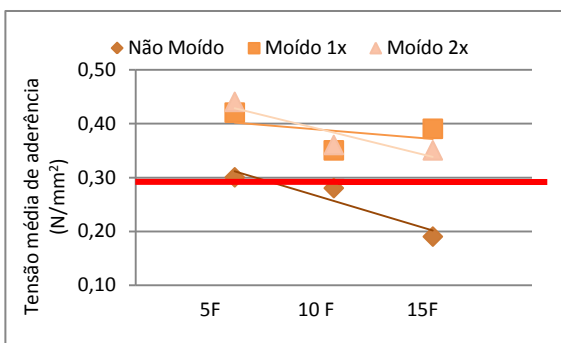
### I. Argamassas com teor de SP constante

Pela observação dos dados apresentados na Figura 4.43 para a série com teor de SP constante repara-se que as argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de FCC apresentam valores de aderência muito inferiores quando comparadas com a argamassa de referência (100C\_SP).

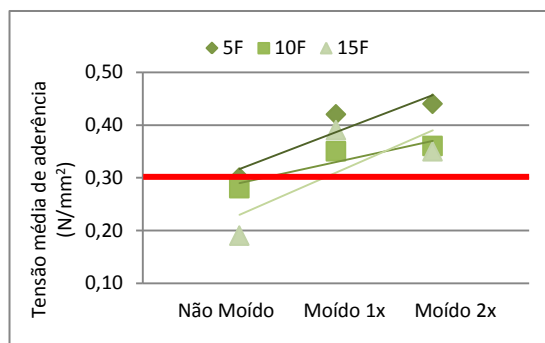
A observação mais evidente quando se analisa a Figura 4.43 é que a introdução de resíduo moído nas argamassas conduz a valores superiores de aderência quando comparado com as argamassas em que este resíduo não se encontra moído. Adicionalmente, quando estas apresentam resíduo moído 1x e 2x, todas as percentagens de substituição estudadas satisfazem os limites mínimos estabelecidos pela norma francesa NF P 15-201 [87] e pela norma brasileira NBR 13749/96 [88], contrariamente àquelas que contêm na sua constituição resíduo não moído que, para 15% de substituição não satisfazem os requisitos destas normas.

A argamassa conducente a um maior valor de aderência para os 5% e 10 % de substituição é aquela que apresenta na sua constituição resíduo de FCC moído 2x.

Nas Figuras 4.44 e 4.45 apresentam-se as representações dos valores incluídos no Quadro 4.13 para a série teor de SP constante com o objectivo de evidenciar os efeitos na aderência quando se aumenta progressivamente a quantidade de resíduo de FCC e quando se aumenta o grau de finura mantendo-se o mesmo teor de incorporação, respectivamente.



**Figura 4.44** - Tensão média de aderência ( $N/mm^2$ ) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série teor de SP constante, por percentagem de resíduo adicionado.



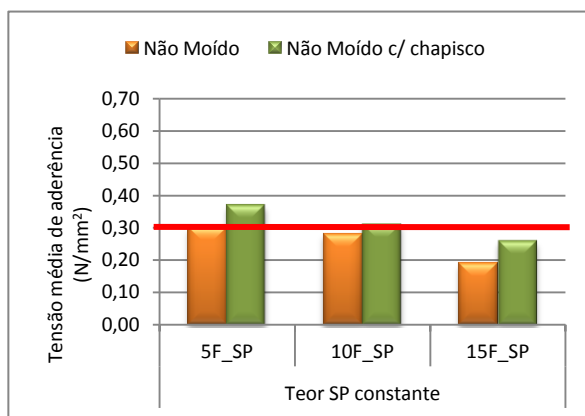
**Figura 4.45** - Tensão média de aderência ( $N/mm^2$ ) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série teor de SP constante, por distribuição do tamanho de partícula do resíduo adicionado.

Pela observação da Figura 4.44 pode verificar-se uma tendência na diminuição da aderência à medida que ocorre a incorporação de FCC, isto é, maiores quantidades de resíduo de FCC, independentemente do tamanho de partícula, originam menores valores de aderência. Sendo esta diminuição mais acentuada quando o resíduo se apresenta não moído e este apresenta sempre valores de aderência inferiores quando comparado com as argamassas que contêm resíduo moído 1x e 2x.

Através da análise da Figura 4.45 observa-se que a diminuição da DTP aumenta a aderência, ou seja, à medida que ocorre uma diminuição de DTP a aderência apresenta uma tendência para aumentar, independentemente da percentagem de substituição efetuada.

Na Figura 4.46 representam-se os resultados obtidos de aderência com e sem camada de chapisco apresentados no Quadro 4.13 para as argamassas que contêm na sua constituição resíduo de FCC não moído.

Da observação da Figura 4.46<sup>6</sup> conclui-se que as argamassas que apresentam como substrato a camada de chapisco apresentam melhores valores de aderência, independentemente da percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC.



**Figura 4.46** - Comparação dos resultados da tensão média de aderência com e sem camada de chapisco para as argamassas incorporação de resíduo de FCC não moído da série teor de SP constante.

Note-se, apesar da colocação de uma camada de chapisco como substrato ocorre uma diminuição da aderência à medida que aumenta a quantidade de substituição de resíduo de FCC.

O aumento da aderência devido à colocação de uma camada de chapisco era expectáveis, uma vez que a preparação do substrato para o recebimento da argamassa, por vezes assume uma relevância determinante para a melhoria da aderência. Uma superfície desprovida de rugosidade pode comprometer a aderência da argamassa ao suporte a que esta se destina.

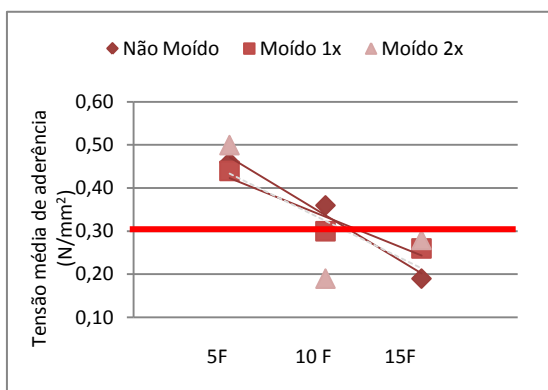
<sup>6</sup> Note-se que a escala das Figuras 4.46 e 4.49 não se apresenta ajustada para poder fazer uma comparação visual entre estas duas representações gráficas e a Figura 4.43.

De acordo com o descrito em cima, também um estudo realizado mostrou que a utilização de blocos de betão como substrato da argamassa aumenta significativamente a aderência quando comparados com tijolos, devido principalmente à rugosidade do substrato [88].

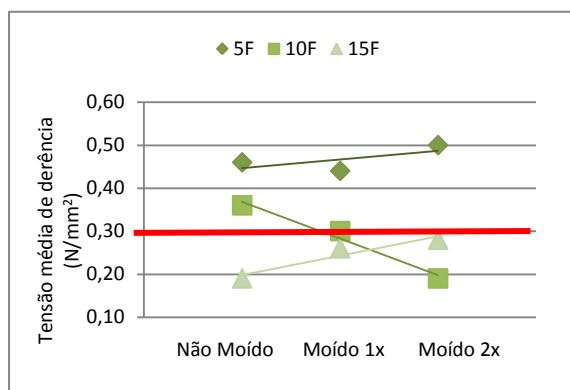
## II. Argamassas com consistência constante:

Da análise dos dados apresentados no Quadro 4.13 e representados na Figura 4.43 para a série de consistência constante, conclui-se que para incorporações de 5% de resíduo de FCC em detrimento de cimento, os valores de aderência apresentam-se sempre superiores ao da argamassa de referência.

As Figuras 4.47 e 4.48 apresentam as representações dos valores incluídos no Quadro 4.13 para a série consistência constante com o objectivo de evidenciar os efeitos na aderência quando se aumenta o teor de incorporação de resíduo de FCC e quando se aumenta o grau de finura mantendo-se o mesmo teor de incorporação, respectivamente.



**Figura 4.47** - Tensão média de aderência ( $N/mm^2$ ) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por percentagem de resíduo adicionado.



**Figura 4.48** – Tensão média de aderência ( $N/mm^2$ ) e respetiva reta de regressão linear das argamassas da série consistência constante, por distribuição do tamanho de partícula do resíduo adicionado.

Da observação da Figura 4.47 verifica-se que existe uma tendência para a diminuição da aderência com o aumento da percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC.

Verifica-se através da análise da Figura 4.48 que os valores de aderência obtidos para as argamassas com consistência constante não apresentam a mesma tendência à medida que ocorre uma diminuição da DTP, isto é, para os 5% e 15% de substituição de cimento por resíduo de FCC, ocorre um aumento da aderência à medida que a finura do resíduo aumenta. Quando a substituição de cimento por resíduo de FCC é de 10% verificou-se o contrário, ou seja, quanto menor é a DTP, menor os resultados obtidos na aderência. Contudo, deve ter-se em conta que neste caso, a quantidade de SP adicionado a cada argamassa variou, e este fator

como se verificou através da análise das duas argamassas de referência é relevante, uma vez que o SP melhora significativamente a aderência da argamassa.

Na Figura 4.49 comparam-se os resultados obtidos apresentados no Quadro 4.11 para a aderência relativamente aos provetes elaborados com e sem camada de chapisco para as argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de FCC não moído.

A introdução de uma camada de chapisco como substrato não provoca alterações significativas na aderência. As argamassas constituídas por 5% e 10% de resíduo de FCC apresentam o mesmo valor de aderência, uma vez que a sua diferença é inferior ao erro do ensaio. Quando a substituição efetuada é de 15% verifica-se resultados ligeiramente superiores quando o substrato apresenta uma camada de chapisco.

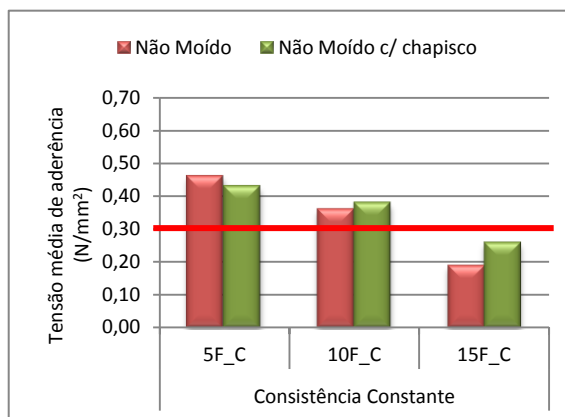


Figura 4.49 - Comparação entre a tensão média de aderência com e sem camada de chapisco para as argamassas com FCC não moído da série consistência constante.

### III. Comparação genérica das duas séries:

O aumento da substituição, em massa, de cimento por resíduo de FCC traduz, para ambas as séries, uma diminuição da aderência, independentemente do tempo de moagem do resíduo adicionado na argamassa.

Com a comparação do efeito da moagem do resíduo nos resultados de aderência conclui-se para ambas as séries, que quando as substituições são de 5 e 15%, a diminuição da distribuição do tamanho de partícula influencia de forma positiva os resultados da aderência, sendo mais notório nas argamassas cujo teor de SP se mantém constante. Por outro lado, quando se substitui 10% de cimento por resíduo de FCC, as duas séries não apresentam a mesma tendência, isto é, quando as argamassas apresentam consistência constante à medida que a finura aumenta a aderência diminui, enquanto na série teor de SP constante ocorre o oposto.

Quando comparada a contribuição da camada de chapisco nas argamassas das diferentes séries, constata-se que naquela em que o teor de SP se manteve constante a camada de chapisco constitui um fator importante para melhores resultados de aderência. No entanto,

para as argamassas de consistência constante a adição de uma camada de chapisco não altera de forma significativa a aderência da argamassa.

### 4.3.4 Absorção de água por capilaridade

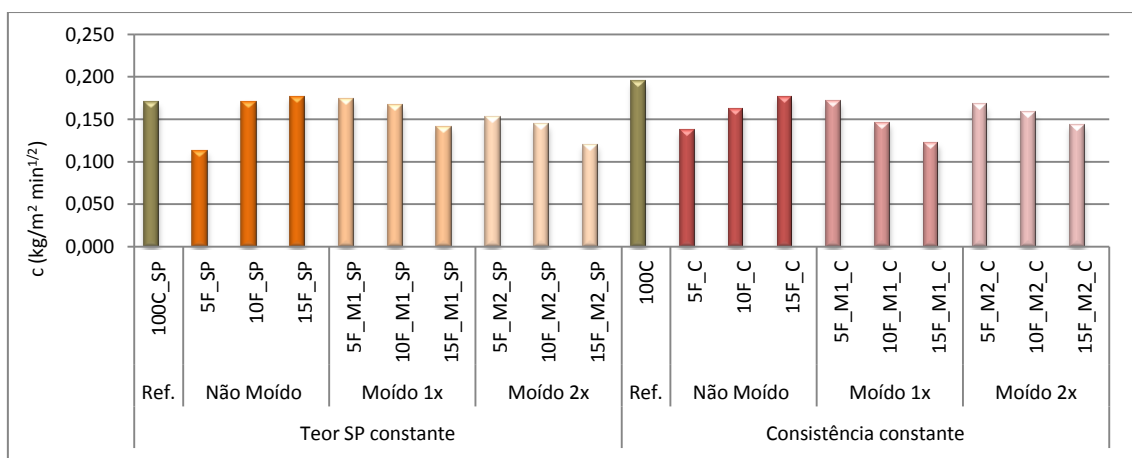
O ensaio de absorção de água por capilaridade foi efetuado, de acordo com o descrito na Subsecção 3.3.6.4, aos 28 dias em semi-prismas devidamente selados com uma cola impermeabilizante.

O coeficiente de capilaridade traduz a velocidade com que a absorção da água se processa nos instantes iniciais. Na Figura 4.50 estão reproduzidos os resultados apresentados no Quadro 4.14 referente aos valores dos coeficientes de capilaridade resultantes do ensaio de capilaridade para as duas séries de argamassas em estudo.

**Quadro 4.14** - Coeficiente de Capilaridade ( $\text{kg/m}^2 \text{min}^{1/2}$ ) para as diferentes argamassas em estudo.

Série	Formulação	Coef. Capilaridade ( $\text{kg/m}^2 \text{min}^{1/2}$ )	Série	Formulação	Coef. Capilaridade ( $\text{kg/m}^2 \text{min}^{1/2}$ )		
Teor SP constante	Referência	100C_SP	0,170	Consistência constante	Referência	100C	0,194
	Não Moído	5F_SP	0,113		Não Moído	5F_C	0,137
		10F_SP	0,170			10F_C	0,161
		15F_SP*	0,176			15F_C*	0,176
		5F_M1_SP	0,174			5F_M1_C	0,171
	Moído 1x	10F_M1_SP	0,166		Moído 1x	10F_M1_C	0,146
		15F_M1_SP	0,141			15F_M1_C	0,122
		5F_M2_SP	0,153			5F_M2_C	0,167
	Moído 2x	10F_M2_SP	0,144		Moído 2x	10F_M2_C	0,158
		15F_M2_SP	0,120			15F_M2_C	0,144

15F\_C\* e 15F\_SP\* correspondem à mesma composição de argamassa (como explicado no subcapítulo 4.1). Contudo, como os resultados obtidos com esta argamassa podem ser comparados com os resultados das outras argamassas de cada uma das "séries" preparadas, assumiu-se designações distintas quando se pretendeu comparar com cada uma das séries



**Figura 4.50**- Coeficiente de Capilaridade ( $\text{kg/m}^2 \text{min}^{1/2}$ ) das argamassas em estudo para as diferentes séries.

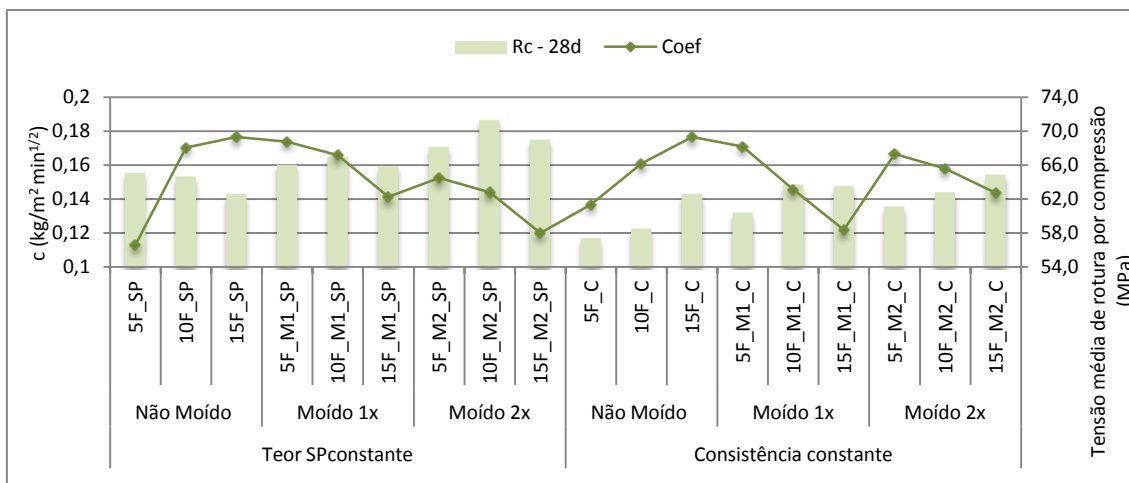
Através de uma análise geral da representação gráfica ilustrada na Figura 4.50 verifica-se que os coeficientes de capilaridade das argamassas estudadas são relativamente baixos, como seria de esperar, tendo em conta que se trata de argamassas à base de cimento.

Pode observar-se que a argamassa conducente a uma maior absorção é a argamassa de referência das argamassas com consistência constante – 100C. Quando comparada com a argamassa de referência da outra série – 100C\_SP – a única variante destas argamassas é a introdução de superplastificante, desta forma pode reter-se que introdução de SP nas argamassas diminui a absorção capilar. Adicionalmente, a absorção de água por capilaridade está diretamente relacionada com a resistência à compressão das argamassas, isto é, quanto maior o valor de resistência à compressão menor é o coeficiente de absorção capilar, o que se verifica, uma vez que a argamassa 100C\_SP apresenta uma resistência à compressão superior à argamassa 100C e por sua vez um menor coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Repare-se pela observação da representação gráfica da Figura 4.50 que, independentemente da série onde estão inseridas, as argamassas que na sua constituição apresentam resíduo não moído o coeficiente de capilaridade tipicamente aumenta com o aumento do teor de incorporação de resíduo, contrariamente àquelas que contêm resíduo moído 1x e 2x cujo coeficiente de capilaridade diminui com aumento do teor de resíduo de FCC.

Estes resultados estão coerentes pelos encontrados por outro autor com o resíduo cinza casca de arroz [84]. Ainda noutro estudo realizado com cinzas volantes também se observou a mesma tendência nos resultados obtidos: as argamassas que apresentam na sua constituição cinzas volantes moídas apresentam menor porosidade capilar quando comparadas com as argamassas que contêm cinzas não moídas [64].

A Figura 4.51 evidencia a relação obtida entre o coeficiente de absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão das argamassas em estudo aos 28 dias de hidratação.



**Figura 4.51** - Relação entre o coeficiente de absorção de água por capilaridade e a tensão média de ruptura por compressão das argamassas em estudo aos 28 dias de hidratação.

Segundo a análise da Figura 4.51 verifica-se que, tipicamente, a um menor valor de absorção de água por capilaridade está associado um maior valor de resistência à compressão.

Esta observação pode ser explicada pela existência de menos vazios internos na argamassa endurecida com adição de FCC com menores dimensões de DTP, proporcionando uma densificação da matriz de cimento que concomitantemente conduz à existência de menores capilares originando desta forma um menor fluxo capilar da água no interior da argamassa.

A constatação evidenciada acima é favorável em termos de durabilidade da argamassa, uma vez que o coeficiente de capilaridade constitui um indicador importante do ponto de vista da degradação das argamassas. A durabilidade de uma argamassa é entendida como a resistência que esta apresenta frente às alterações físico-químicas causadas pelo ambiente. Um dos principais fatores de degradação é a água, devido aos ciclos de gelo-degelo, isto é, a passagem sistemática da água do estado líquido para o sólido, originando mudanças de volume consecutivas no interior dos poros da argamassa que levam à ruptura desta. Nesta perspectiva, menores valores de coeficiente de absorção de água por capilaridade preservam a argamassa face à ação da água, uma vez que a sua capacidade de absorção é menor.

#### **I. Argamassas com teor de SP constante:**

Nas Figuras 4.52, 4.53 e 4.54 apresenta-se a evolução da absorção capilar no tempo para as argamassas que constituem a série teor de SP constante para substituições parciais de cimento por resíduo de FCC de 5,10 e 15%, com o intuito de facilitar a comparação das alterações ocorridas pela introdução de diferentes dimensões da partícula de resíduo na absorção capilar das argamassas ao longo do tempo.

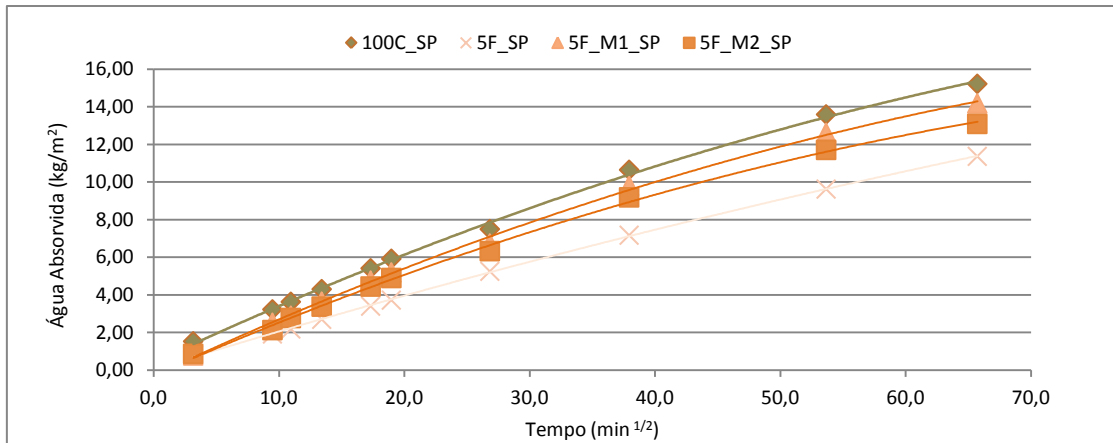


Figura 4.52 - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas teor de SP, por 5% de resíduo adicionado.

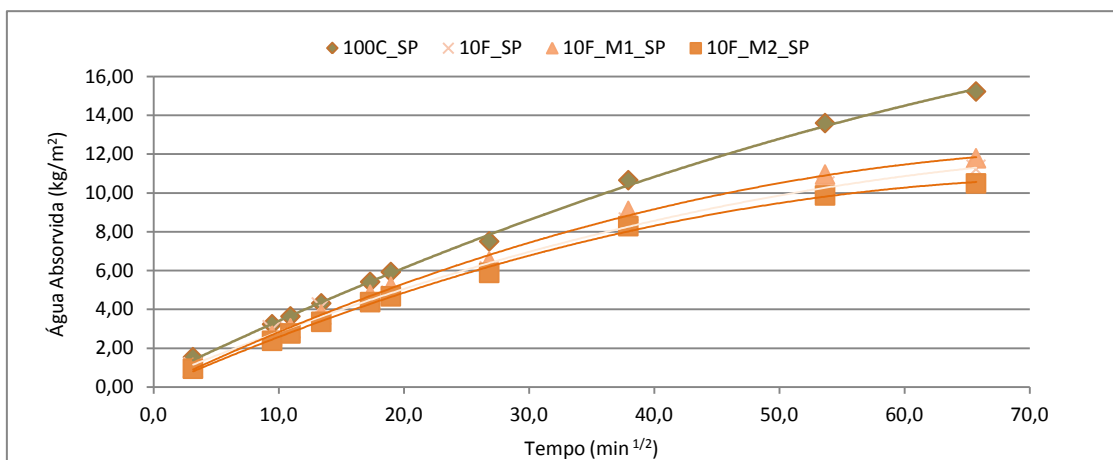


Figura 4.53 - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas teor de SP, por 10% de resíduo adicionado.

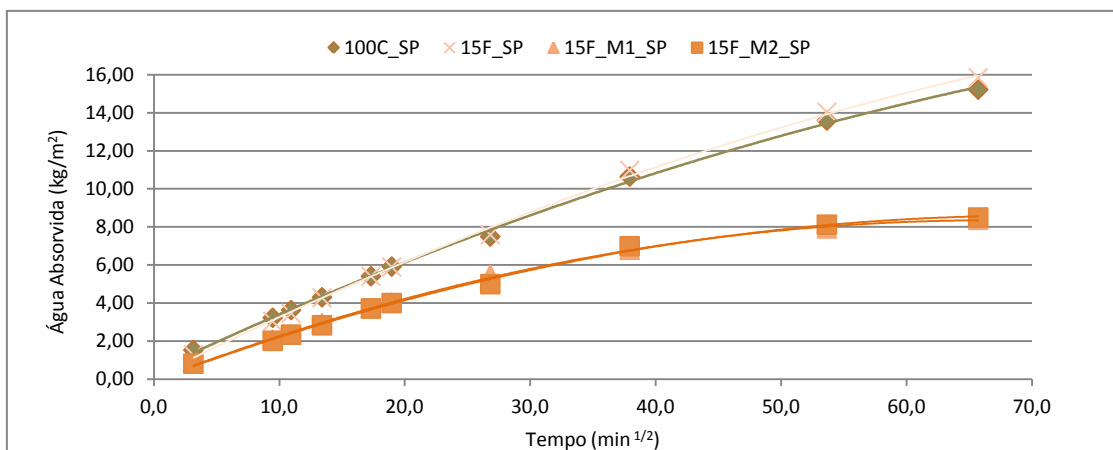


Figura 4.54 - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas teor de SP, por 15% de resíduo adicionado.

Da análise dos resultados representados nas Figuras 4.52, 4.53 e 4.54 observa-se que a introdução de resíduo de FCC nas argamassas conduz a uma diminuição da absorção capilar, com exceção da argamassa 15F\_SP que apresenta valores de absorção capilar ligeiramente superiores ao da argamassa de referência 100C\_SP, contudo inferior ao erro do próprio ensaio.

Verifica-se ainda da observação conjunta das três representações gráficas que, tal como os coeficientes de absorção capilar indicam, os valores obtidos pelas argamassas com resíduo de FCC moído 1x e 2x, diminuem com o aumento da quantidade de resíduo de FCC, observando-se que à medida que ocorre a substituição de cimento por resíduo de FCC a aproximação das curvas de absorção destas duas argamassas.

Através da apreciação da representação gráfica da Figura 4.52 é possível verificar que para uma substituição, em massa, de cimento por 5% de resíduo, a argamassa que apresenta uma menor absorção de água é aquela cujo resíduo se apresenta não moído.

Os valores de absorção capilar obtidos para 10% de substituição (Figura 4.53) são muito semelhantes para as diferentes argamassas pelo que para esta percentagem de incorporação a absorção de água pelas argamassas verifica-se pouco sensível à DTP. Porém aquela que apresenta melhores resultados é a argamassa cujo resíduo se apresenta moído 2x - 10\_M2\_SP.

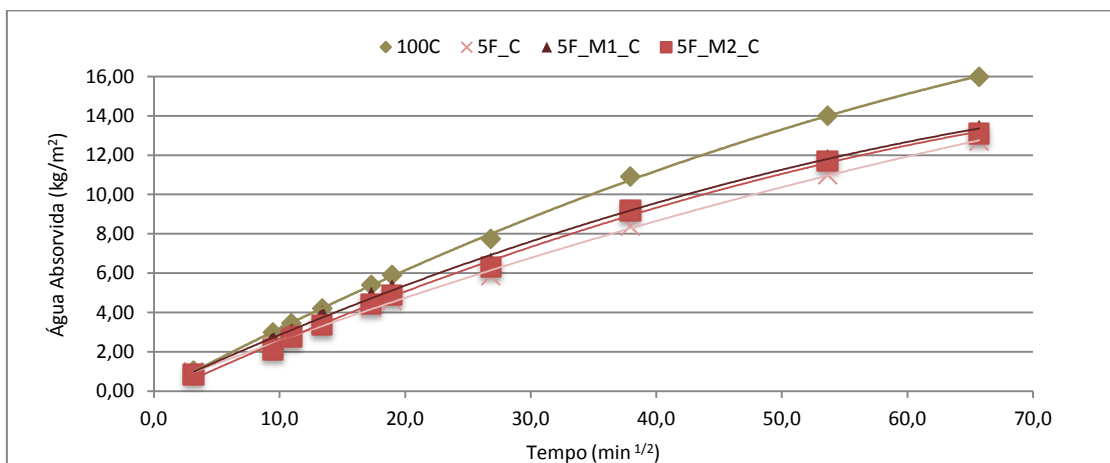
Para uma substituição, em massa, de 15% de cimento por resíduo de FCC (Figura 4.54) a argamassa 15\_SP apresenta valores ligeiramente superiores, contudo esta dispersão é inferior ao erro do próprio ensaio, quando comparada com a argamassa 100C\_SP. No entanto, o mesmo não se verifica para as argamassas cujo resíduo se apresenta moído. Quando a DTP diminui, para uma substituição de 15% os valores obtidos diminuem quando comparada com as outras percentagens de substituição. Desta forma, contrariamente ao que acontece com substituição parcial de 5% e 10% de cimento por resíduo de FCC, para uma substituição parcial de 15%, as curvas das argamassas que apresentam resíduo moído 1x e 2x, além de apresentarem valores muito semelhantes, revelam uma tendência para a estabilização dos valores de absorção logo ao fim de 48 h (corresponde a  $60 \text{ min}^{1/2}$  nas Figuras).

Constata-se pela análise das Figuras 4.52, 4.53 e 4.54 que não é possível uma argamassa que apresente sempre melhores resultados para as diferentes percentagens de substituição:

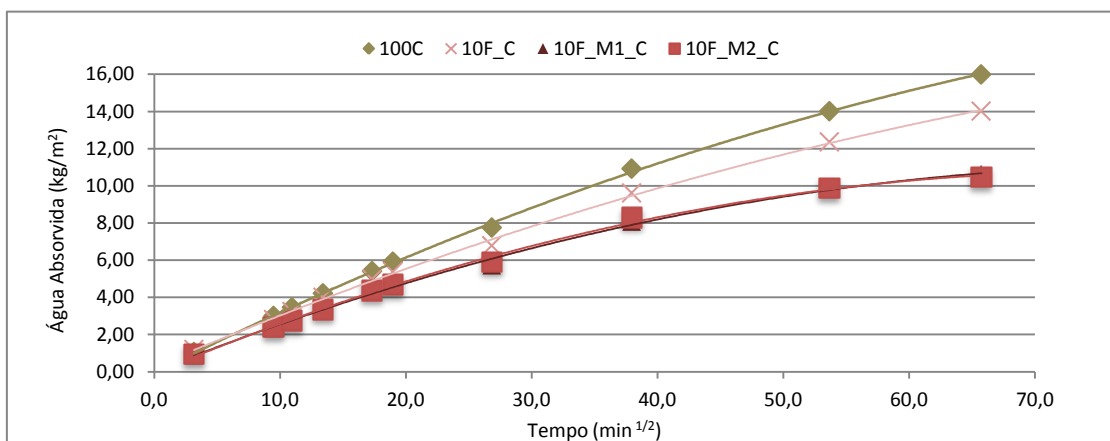
- Com 5% de substituição a argamassa que verifica menores valores de absorção é a 5\_SP;
- Com 10% de substituição a argamassa que revela melhores resultados de absorção capilar é aquela que contém na sua constituição resíduo de FCC moído 2x – 10F\_M2\_SP
- Com 15% de substituição de cimento por resíduo de FCC a argamassa 15\_M1\_SP e 15\_M2\_SP apresentam, conjuntamente, os valores mais baixos de absorção de água.

**II. Argamassas consistência constante:**

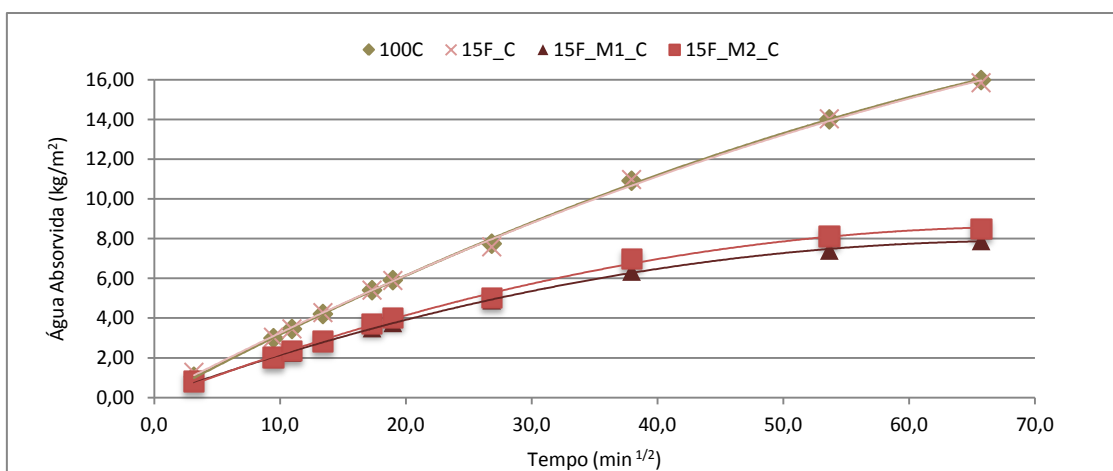
Nas Figuras 4.55, 4.56 e 4.57 apresenta-se a evolução da absorção capilar no tempo para as argamassas que constituem a série teor de SP constante para substituições parciais de cimento por resíduo de FCC de 5%, 10% e 15%, com o intuito de facilitar a comparação das alterações ocorridas pela introdução de diferentes dimensões da partícula de resíduo na absorção capilar das argamassas ao longo do tempo.



**Figura 4.55** - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas com consistência constante, por 5% de resíduo adicionado.



**Figura 4.56** - Absorção capilar e respetiva reta de regressão polinomial das argamassas com consistência constante, por 10% de resíduo adicionado.



**Figura 4.57** - Absorção capilar e respectiva reta de regressão polinomial das argamassas com consistência constante, por 15% de resíduo adicionado.

Através da observação das Figuras 4.55, 4.56 e 4.57 verifica-se, à exceção da argamassa 15F\_C – que apresenta um valor de absorção igual à argamassa de referência - que a incorporação de resíduo de FCC nas argamassas, independentemente da DTP, traduz-se numa diminuição da absorção da água por capilaridade. Adicionalmente constata-se que as argamassas que contêm na sua constituição resíduo moído apresentam valores de absorção de água muito semelhantes ao longo do tempo, pelo que, a moagem do resíduo 2x parece irrelevante.

Pela análise da Figura 4.55 constata-se que para substituições de 5% em massa de cimento por resíduo de FCC as argamassas estudadas revelam resultados muito semelhantes, pelo que para esta percentagem de substituição a DTP é irrelevante. No entanto, para 10% de substituição as argamassas começam a divergir nos seus valores: as que apresentam resíduo moído divergem da argamassa de referência, contrariamente aquela que apresenta resíduo moído converge para a argamassa de referência.

Da observação conjunta das três Figuras apresentadas anteriormente - 4.55, 4.56 e 4.57 – observa-se que quando as argamassas apresentam consistência constante, aquelas que contêm na sua constituição resíduo moído – independentemente do grau de moagem – revelam melhores características de absorção capilar, isto é, absorvem menos quantidade de água.

### III. Comparação genérica das duas séries:

Com base na análise da representação gráfica da Figura 4.50 verifica-se que tanto as argamassas com teor de SP constante como as com consistência constante demonstram a mesma tendência de absorção até aos 90 minutos. Desta forma, para ambas as séries, quando

o resíduo de FCC presente na argamassa se encontra não moído, com o aumento da percentagem de incorporação de resíduo de FCC a absorção capilar aumenta. Por outro lado, quando este resíduo se encontra moído, a tendência inverte-se, isto é, com o aumento progressivo de teor de resíduo de FCC a absorção capilar diminui.

Quando comparadas a absorção capilar ao fim de 72h (corresponde a  $70 \text{ min}^{1/2}$  nas Figuras) verifica-se que as argamassas com teor de SP constante não apresentam uniformidade, ou seja, dependendo da percentagem de substituição existe uma argamassa que demonstra melhores resultados. O mesmo não acontece para a série consistência constante, uma vez que se conclui que as argamassas que apresentam resíduo moído apresentam resultados superiores independentemente da percentagem de substituição.

# 5

## Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

*“Um pessimista vê dificuldade em cada oportunidade; o  
otimista vê oportunidade em cada dificuldade”*

Winston Churchill

## 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os materiais à base de cimento são os mais utilizados na construção, pelo que o recurso ao cimento é incontornável e a sua utilização é uma realidade presente e futura (Figura 2.3). No entanto, como exposto anteriormente os impactos ambientais associados à produção de clínquer são significativos (subsecção 2.2.1.1). Uma das medidas possíveis conducentes à mitigação dos impactos ambientais associados à produção deste material consiste na substituição parcial do cimento por outros produtos (subsecção 2.2.1.2), nomeadamente subprodutos de outra indústria (subcapítulo 2.4). Tendo em consideração que o resíduo de FCC, produzido na refinaria de Sines, é um material promissor como substituto parcial do cimento [8, 7] este trabalho pretendeu, sobretudo, avaliar o impacto da moagem do resíduo de FCC nas propriedades das argamassas em que é incorporado.

O presente capítulo expõem-se as principais conclusões retidas pela elaboração deste estudo relativamente ao efeito da diminuição de DTP do resíduo de FCC nas propriedades das argamassas no estado fresco (secção 3.3.5) e no estado endurecido (secção 3.3.6). Apresentam-se, também, as principais conclusões que se retiraram do facto de se adotarem abordagens diferentes de preparação das argamassas com incorporação parcial de cimento, isto é analisam-se as diferenças que se verificam nos resultados das argamassas preparadas com substituição parcial progressiva de cimento por resíduo de FCC (entre os 5 e os 15%), em que a consistência das argamassas, no estado fresco, é diferente ou quando é imposta a mesma consistência às argamassas, recorrendo à adição de superplastificante. Por fim, propõem-se – Subcapítulo 5.3 – as sugestões de atividades a realizar em desenvolvimentos futuros no âmbito da investigação da utilização do resíduo de FCC como substituto parcial do cimento.

## 5.2 CONCLUSÕES GERAIS

A principal conclusão a retirar neste trabalho é que apesar da moagem do resíduo de FCC fornecido pela refinaria da Petrogal, em Sines, conduzir, tipicamente, a alteração nos resultados das propriedades estudadas das argamassas, estas diferenças não são, geralmente, significativas. Assim na perspetiva da indústria do cimento, dado que a moagem de um constituinte do cimento tem associada consumos energéticos significativos com implicações ambientais e financeiras, embora seja necessária uma análise mais aprofundada sobre o custo-benefício (particularmente, tendo em consideração a aplicação a que se destina), em termos

tecnológicos, não se parece obter uma vantagem significativamente evidente com a moagem do resíduo deste FCC.

Relativamente à abordagem experimental a utilizar na análise do efeito da substituição parcial de cimento por resíduo, particularmente no que respeita à importância de manter a consistência das argamassas no estado fresco constante, verificou-se pela análise dos resultados obtidos neste estudo que, a série das argamassas em que apenas se variou o teor de resíduo incorporado (não garantindo consistência constante no estado fresco - série com o teor de SP constante) conduz tipicamente a resultados cuja tendência nos valores das propriedades estudadas é melhor definida e, ainda, a valores de resistência à compressão superiores do que os que se verificam nas argamassas cuja consistência foi mantida constante.

Por outro lado, uma vez que na série das argamassas com consistência constante a semelhança dos valores da fluidez foi garantida com o ajuste no teor em SP, as diferenças que se verificaram nos valores das diferentes propriedades estudadas entre as argamassas desta série têm que ser analisadas como sendo um resultado do efeito do teor de resíduo incorporado e do efeito da diferença de quantidade de SP utilizada na mistura da argamassa. Neste contexto, parece poder concluir-se que – à exceção das situações em que função da aplicação a que as argamassas se destinam estas tenham mesmo que apresentar propriedades reológicas específicas – a série das argamassas nas quais apenas se fez variar o teor de incorporação de resíduo de FCC é mais adequada ao estudo do efeito da substituição parcial de cimento por resíduo do que a série das argamassas com consistência constante.

De seguida apresentam-se as conclusões do efeito da substituição parcial de cimento por resíduo de FCC a que se chegaram a partir da análise dos resultados experimentais obtidos, neste trabalho, para as argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

### 5.2.1 Ensaio no estado fresco

---

Dos resultados dos ensaios de estado fresco em argamassas que contêm na sua constituição catalisador exausto de FCC pode reter-se as seguintes conclusões:

#### **Consistência por espalhamento**

- Nas duas séries de argamassas preparadas com incorporação 5, 10, 15% (em massa) de resíduo com diferentes finuras (tal como recebido, moído 1x e 2x), o aumento do teor de resíduo de FCC incorporado traduziu-se, tipicamente, na diminuição da fluidez

da argamassa. Esta diminuição é menos significativa para as argamassas que apresentam resíduo moído 1x e 2x.

- Na série das argamassas com SP constante, verifica-se que para substituições parciais de 15% de cimento por resíduo, a moagem do resíduo 1x e 2x aumenta significativamente a trabalhabilidade da argamassa. Por outro lado, para substituições de 5% e 10%, a trabalhabilidade mantém-se sensivelmente constante para as diferentes finuras (não moído, moído 1x e moído 2x) – Figura 4.3.
- Na série de argamassas de consistência constante, o aumento da finura do resíduo de FCC teve como consequência a redução da quantidade de SP a adicionar para que se atingisse a consistência pré-definida para a argamassa (Quadro 3.4).

#### **Massa volúmica**

- Nas duas séries estudadas, a substituição parcial de cimento por resíduo de FCC origina argamassas com massas volúmicas inferiores, quando comparadas com as argamassas de referência (Figura 4.6). Adicionalmente, um maior valor de massa volúmica está tipicamente associado a um maior valor de consistência por espalhamento.
- No que respeita às argamassas da série teor de SP constante, tipicamente uma maior substituição de resíduo de FCC conduz a menores valores de massa volúmica (Figura 4.7). A diminuição da DTP do resíduo origina maiores valores de massa volúmica, para a mesma percentagem de substituição parcial (Figura 4.8).
- Nas argamassas da série consistência constante, a moagem do resíduo conduz a alterações pouco significativas com aumento progressivo da substituição parcial de cimento por resíduo. Esta propriedade, para mesmas percentagens de substituição parcial, não apresenta resultados conclusivos com a diminuição de DTP.

#### **Teor de ar**

- O teor de ar, nas duas séries realizadas, diminui à medida que se aumenta a substituição parcial de resíduo de FCC não moído por cimento. Adicionalmente, quando este se apresenta moído os valores obtidos para o teor de ar apresentam-se muito semelhantes com a substituição progressiva de cimento por resíduo de FCC. Verifica-se, tipicamente, que um maior valor de massa volúmica está associado a um menor valor de teor de ar.
- Tanto na série teor de SP constante como consistência constante verifica-se que o teor de ar e a diminuição de DTP não apresentam relações conclusivas.

### 5.2.2 Ensaio no estado endurecido

Através da realização dos ensaios no estado endurecido em argamassas que contêm na sua constituição catalisador exausto de FCC pode reter-se as seguintes conclusões:

#### **Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas**

- Em ambas as séries realizadas, a avaliação da resistência mecânica recorrendo a um método de ensaio não destrutivo – velocidade de propagação de ondas ultrassônicas – revelou-se sensível à substituição parcial de cimento por resíduo de FCC. A substituição progressiva de cimento por resíduo está tipicamente associada a um menor velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Esta diminuição é mais evidente nas argamassas com consistência constante.
- Na série teor de SP constante a diminuição da DTP para substituições em massa de 15% de cimento por resíduo de FCC conduz a um aumento da velocidade das ondas ultrassônicas a partir dos 28 dias de hidratação.
- Para as argamassas que constituem a série consistência constante a moagem do resíduo traduz melhores resultados de velocidade de propagação para todas as idades de hidratação, com exceção dos 28 dias.
- Nas duas séries em estudo, a utilização de dois tipos de transdutores – 54kHz e 150kHz – para a realização do ensaio de ultrassons revelou-se pouco sensível no que respeita à velocidade de propagação da onda ultrassônica, uma vez que as velocidades obtidas por cada um destes transdutores são semelhantes. No entanto, a utilização destes dois transdutores pode complementar de forma mais detalhada as características do material, nomeadamente através do estudo da amplitude das ondas obtidas pelo osciloscópio.
- Verifica-se que a avaliação da resistência à compressão por um método não destrutivo – velocidade de propagação de ondas ultrassônicas – revelou-se adequada e sensível às variações de resistência registadas. Sendo que, para maiores resistências à compressão está associada uma maior velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

#### **Resistência Mecânica**

- Na série de argamassas com teor de SP constante, as argamassas apresentam um aumento na resistência à flexão até aos 28 dias de hidratação que tende a estabilizar a partir desta idade. Tanto o aumento progressivo da substituição de cimento por resíduo de FCC como a diminuição de DTP têm consequências pouco significativas nos

resultados de resistência à flexão, uma vez que os valores se apresentam todos muito próximos. Contudo, as argamassas que apresentam os valores mais elevados de resistência à flexão, a partir dos 28 dias de cura, são as argamassas em que o resíduo se encontra moído 1x e 2x.

- A resistência à flexão, para a série de argamassas de consistência constante, apresenta valores muito semelhantes entre si (variam entre 8,8-9,9 MPa) a partir dos 28 dias de hidratação, independentemente tanto do teor de incorporação de resíduo de FCC nas argamassas como da DTP do resíduo de FCC que esta apresenta na sua constituição.
- Para as argamassas da série teor de SP constante a diminuição de DTP nesta série de argamassas conduz a um aumento da resistência à compressão, sendo que esta resistência das argamassas varia para todas as percentagens de substituição de cimento por resíduo de FCC da seguinte forma:  $R_c \text{ FCC não moído} < R_c \text{ FCC moído 1x} < R_c \text{ FCC moído 2x}$ .
- Na série de argamassas de consistência constante, a percentagem de substituição parcial que conduz a valores de resistência à compressão mais elevados depende da moagem do resíduo introduzido na argamassa, assim:
  - Nas substituições parciais de cimento por resíduo de FCC não moído e moído 2x, tipicamente, os valores de resistência mais elevados obtêm-se para 15% de substituição.
  - Nas argamassas em que o resíduo se encontra moído 1x, os 10% de substituição conduzem a resultados de resistência à compressão mais elevados.
- A comparação dos resultados de resistência à compressão obtidos para as duas séries permite concluir que as argamassas que apresentam um teor de SP constante apresentam valores de resistência à compressão superiores.
- À luz da norma NP EN 197-1 [25], as argamassas que constituem a série teor de SP constante e consistência constante e que apresentam resíduo moído e substituições de 10% e 15%, aos 28 dias de hidratação superam os limites máximos referidos nesta norma para a classe de cimento 42,5R. Nesta perspetiva, a classe de resistência destas argamassas assume os valores de resistência da classe de cimentos 52,5 R (ver Quadro 5.3 e 5.4).
- O coeficiente de ductilidade das argamassas de ambas as séries de argamassas preparadas apresentam valores inferiores às argamassas de referência verificando-se uma tendência para diminuir ao longo do tempo, sendo esta descida bastante acentuada dos dois para os sete dias de hidratação para todas as argamassas em estudo.

**Índice de Atividade pozolânica**

- Na série de argamassas com teor de SP constante a substituição em massa de 10% de cimento por resíduo de FCC - independentemente da DTP - conduz a resultados de IA superiores quando comparados com as percentagens de substituição de 5% e 15%.
- As argamassas da série consistência constante apresentam valores de IA superiores para substituição parciais de 10% quando o resíduo se encontra moído 1x de e 15% quando o resíduo se apresenta não moído e moído 2x.

**Arrancamento por tração - aderência**

- As duas séries de argamassa em estudo apresentam o mesmo comportamento face à aderência, verificando-se que um aumento progressivo da substituição, em massa, de cimento por resíduo de FCC conduz a uma diminuição da aderência da argamassa.
- Na série de argamassas com teor de SP constante observa-se que a diminuição de DTP se traduz num aumento da aderência para todas as percentagens de substituição parcial. A aplicação de uma camada de chapisco no substrato origina um ligeiro aumento da aderência das argamassas.
- No que respeita à aderência das argamassas com consistência constante, conclui-se que a diminuição de DTP – no caso das argamassas com incorporação de 5% e 15% de resíduo de FCC, conduz ao aumento dos valores de aderência. A aplicação de uma camada de chapisco no substrato conduz a um aumento da aderência nas argamassas desta série com incorporação de 15% de resíduo de FCC.

**Absorção de água por capilaridade**

- As duas séries de argamassa em estudo apresentam o mesmo comportamento face à absorção de água por capilaridade, verificando-se que um aumento progressivo da substituição, em massa, de cimento por resíduo de FCC conduz a uma diminuição da absorção de água por capilaridade quando o resíduo se encontra moído 1x e 2x.
- Também em ambas as séries realizadas, quando as argamassas apresentam resíduo não moído, verifica-se um aumento da absorção de água por capilaridade com o aumento da incorporação de resíduo de FCC.

### 5.3 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após as conclusões retiradas pela realização deste estudo algumas questões não ficaram totalmente esclarecidas pelo que, futuramente seria vantajoso aprofundar-se o conhecimento de alguns aspectos relativamente à substituição parcial de cimento por resíduo de FCC.

Propõem-se de seguida algumas linhas de investigação que completam o presente estudo e propõe-se que sejam adotadas apenas na série de argamassas com teor de SP constante:

- Analisar a atividade pozolânica do resíduo de FCC por outras técnicas experimentais: ensaio de Chapelle, Frattini e termogravimetria.
- Correlacionar os resultados obtidos de consistência por espalhamento das argamassas com os valores de área superficial específica do catalisador exausto de FCC tal como é recebido da refinaria e depois de moído tanto 1x como 2x, obtidos pelo método de B.E.T.
- Aprofundar o conhecimento do efeito de resíduo em estudo nas argamassas através da observação e análise química local por microscopia eletrónica de varrimento (MEV) e espectrometria de energia dispersiva (EDS) em amostras de fratura e de secção transversal polida.
- Avaliar a pozolanicidade do resíduo de FCC através do estudo da influência da diminuição da gama de DTP do catalisador na resistência à compressão das argamassas. A diminuição da gama de DPT obtém-se através da peneiração do resíduo não moído.
- Verificar o efeito da incorporação de resíduo de FCC moído 1x e 2x na propriedade de aderência das argamassas.
- Contribuir para a definição de uma norma de ensaios de avaliação de propriedades em argamassas – nomeadamente, resistência mecânica – recorrendo à velocidade de propagação de ondas ultrassónicas.
- Avaliar alterações de amplitude das ondas obtidas no osciloscópio pelos dois transdutores - 54 kHz e 150 kHz.

**LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] REIS,R. - Betões Eco-Eficientes com Cinzas Volantes e Metacaulino. Minho: Universidade do Minho, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [2] WBCSD - Cement roadmap targets 2010. OECD/IEA and The World Business Council for Sustainable Development, 2009.
- [3] PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. - Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R): An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures. 29ª ed.:Cement and Concrete Research, 1999. pp. 1773-1779.
- [4] TSENG, Y. et al. - The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials. 11ª ed.: Cement and Concrete Research v. 29, 2005. pp. 782-787.
- [5] ZORNOZA, E. et al. - Compatibility of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) with various types of cement. 3ª ed.: Advances in Cement Research v. 19, 2007. pp 117-124.
- [6] CUNHA,A. - Caracterização e estudo de aplicação de rejeito catalítico de unidade FCC como material pozolânico. Brasil,Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Química, 2012. Dissertação de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.
- [7] CONCEIÇÃO, M. - Reutilização do Catalisador exausto da Indústria Petroquímica em materiais à base de Cimento. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [8] FAUSTINO, R. - Produção de Argamassas de Cimento com Incorporação de um Resíduo da Refinação de Petróleo. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [9] COSTA,C; MARQUES,P - "Low-Carbon Cement with Waste Oil-Cracking Catalyst Incorporation, San Antonio - Texas, EUA : IEEE/PCA Cement Industry Conference, Maio 2012.
- [10] COSTA,C.; MARQUES, P.; CARVALHO,P. - Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of Binary Blended Cement Mortars Containing Waste Oil-Cracking Catalyst, Trondheim, Norway: International Congress on Durability of concrete CDC2012-D-11-00106R1, Junho 2012.
- [11] PACEWSKA, B. et al. - An attempt to improve the pozzolanic activity of waste aluminosilicate catalyst. Thermal Analysis and Calorimetry v. 77, 2002. pp 133-142.

- [12] BASADELLA, E. et al. - Exhausted fluid catalytic cracking catalyst as raw materials for zeolite synthesis. *Applied Catalysis* Vol.66, 2006. pp 186-191.
- [13] PACEWSKA, B. et al. - Modification of properties of concrete by a new pozzolan a waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed. 32ª ed.: *Cement and Concrete Research*, 2002. pp 145-152.
- [14] CUNHA, A. et al - A study of the particle size effect on the pozzolanic activity of an equilibrium catalyst. 106ª ed. : *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Dezembro 2011. pp 805-809.
- [15] ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS - Centro de Estudos em Economia da Energia, dos Transportes e do Ambiente. Disponível em: <http://www.ceeeta.pt/energia/> .[Acedido em 08 02 2012].
- [16] FERREIRA, C. - Os gases de efeito de estufa e a problemática da responsabilidade social e ambiental das empresas portuguesas: o caso das cimenteiras. Lisboa: Instituto Superior de Contabilidade e Administração, 2010. Dissertação de Mestrado em Contabilidade e Administração.
- [17] LACASTA, N.; BARATA,P. - O protocolo de quioto sobre alterações climáticas : análise e perspectivas. Programa: Clima e Eficiência Energética, Julho 1999. pp 1-23.
- [18] J. J. e. a. J.R. Petit, "Climate and atmospheric history of the past 400 000 years from the vostok ice core in Antarctica," 1999. [Online]. Available: <http://www.grida.no/publications/vg/climate/page/3057.aspx>. [Acedido em 12].
- [19] CORREA, G.; LIMA,. - Influência do teor de pozolana na compatibilidade de aditivos polifuncionais em cimentos pozolânicos. Brasil – Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008. Dissertação para obtenção do grau de Tecnólogo de Concreto.
- [20] COTUINHO, J. - *Materias de Construção 2 - Ligantes e Caldas*. Porto: Universidade do Porto - Departamento de Engenharia Civil 2002 (actualizado em 2006).
- [21] SECIL, Portugal. Disponível em: [http://www.secil.pt/default.asp?pag=proc\\_fabrico](http://www.secil.pt/default.asp?pag=proc_fabrico). [Acedido em 18 06 2012].
- [22] CARVALHO,M. - *Impactos e Conflitos da Produção de Cimento no Distrito Federal*. Brasil: Universidade de Brasília - Centro de desenvolvimento Sustentável, 2008. Dissertação de Mestrado.
- [23] "CIMPOR, Portugal. Disponível em:< [http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?lang=pt&id\\_object=29&name=Producao--cimento](http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=29&name=Producao--cimento)> . [Acedido em 18 6 2012].

- [24] VIEIRA, J. - Interacção cimento-superplastificante - Avaliação da estabilidade do comportamento. Lisboa : Instituto Superior Tecnico – Universidade Técnica de Lisboa,2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [25] NP EN 197-1. Abril 2001, Cimento - Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, Caparica: IPQ.
- [26] 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,2012.Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana.
- [27] SCHNEIDER, M. et al. - Sustainable cement production - present and future. 41ª ed.: Cement and Concrete Research, 2011. pp 642-650.
- [28] WBCSD - Rumo a uma indústria cimenteira sustentável. Battelle Memorial Institute, ISBN: 2-240940-36-1. pp. 2-7.
- [29] CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP, 2009. Disponível em: <[http://www.iea.org/papers/2009/Cement\\_Roadmap\\_Foldout\\_WEB.pdf](http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap_Foldout_WEB.pdf)>. [Acedido em 11 09 2012].
- [30] WBCSD, Disponível em: < <http://www.wbcscement.org/> > . [Acedido em 11 09 2012].
- [31] MARQUES, S. - Estudo de Argamassas de Reabilitação de Edifícios Antigos. Aveiro - Universidade de Aveiro,2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia Cerâmica e do Vidro.
- [32] COSTA, C.; CARVALHO, P.; BORDADO, J.; NUNES, A. - Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Electrónica de Varrimento. Vol 21 : Ciência e tecnologia dos materiais, 2009. pp 31-35.
- [33] THOMAZ, E. - Hidratação do cimento Portland. Disponível em: <[https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:5WKBS4PRPtUJ:aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/Hidratacao\\_do\\_cimento.pdf+hidrataçãodo+cimento+portland+prof+Eduardo&hl=pt-PT&gl=pt&pid=bl&srcid=ADGEEShVGx\\_Oreauvl2mZEV\\_ZDhE44-h56awif0QJsK81k\\_qekRYnivAEjErc.](https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:5WKBS4PRPtUJ:aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/Hidratacao_do_cimento.pdf+hidrataçãodo+cimento+portland+prof+Eduardo&hl=pt-PT&gl=pt&pid=bl&srcid=ADGEEShVGx_Oreauvl2mZEV_ZDhE44-h56awif0QJsK81k_qekRYnivAEjErc.)> [Acedido em 04 07 2012].
- [34] HEWLETT, P. - Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Elsevier Science & Technology , Janeiro 2004. ISBN: 0750662565.
- [35] MARTIN, C.; LAURENCE, P.; RINGOT, E. - Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with

- compressive strength. 36ª ed.: Cement and Concrete Research - France, Elsevier, 2006. pp 264 -277.
- [36] AMARO, J. - Caracterização de argamassas para reparação de betão. Lisboa : Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2011. : Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil.
- [37] MARGALHA, M. - Argamassas - Conservação e Recuperação do Património. Évora: Universidade de Évora: Departamento de Engenharia civil - Documento de apoio às aulas de conservação e recuperação do património.
- [38] PAULO, R. - Caracterização de argamassas industriais. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2006. Dissertação de Mestrado em Engenharia Cerâmica e do Vidro.
- [39] SOUSA, S. – Betões eco-eficientes com cinza de casca de arroz. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [40] FILHO, J.; ROLIM, J.; FILHO, R. – Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento portland. 3ª ed. : Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.4 – construções rurais e ambiental, 2000. pp 437 - 444.
- [41] KRUGER, F. et al. - Incorporação de vidro plano moído em substituição ao cimento e ao agregado miúdo (areia) em argamassas de concreto. Brasil :Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão .Coordenação do Curso de Tecnologia em: 25ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química.
- [42] TORRAL, F.; JALALI, S. - Betão Eco- Eficiente: O Futuro da Indústria do Betão Pronto. APEB- Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, Abril 2011. pp 22 -27.
- [43] TORRAL, F.; JALALI, S. - Eco-eficiência dos materiais de construção. Revista APCMC nº 147 ISSN 8443-4194, Janeiro 2010. pp 47-71.
- [44] CASTELLANOS, N; AGREGO, J. - Using spent fluid catalytic cracking (FCC) catalyst as pozzolanic addition - a review. 30ªed. : INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN,2010. pp 35-42.
- [45] GOOGLE docs, Portugal. Disponível em: < <http://www.fcmc.es.gov.br/download/Petroleo.pdf> > [Acedido em 12 2 2012].
- [46] Portal laboratórios virtuais de processos quimicos - Caso de estudo. Disponível em: [http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com\\_content&task=view&id=24&Itemid=415](http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=24&Itemid=415)>. [Acedido em 21 6 2012].

- [47] DIRECTÓRIO DE ARTIGOS GRATUITOS – Artigonal. Disponível em: <<http://www.artigonal.com/educacao-online-artigos/a-refinacao-do-petroleo-4168842.html>>. [Acedido em 24 09 2012].
- [48] Consumo de betão no mundo. Disponível em: < [http://www.universodopetroleo.com.br/2010/07/saiba-como-acontece-o-processo-de\\_13.html](http://www.universodopetroleo.com.br/2010/07/saiba-como-acontece-o-processo-de_13.html)>. [Acedido em 21 6 2012].
- [49] COSTA, R. - Utilização de Catalisadores de Cracking catalítico na despolimerização do poli(metracrilato de metilo). Lisboa: Universidade Nova de Lisboa- Faculdade de ciências e Tecnologias, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.
- [50] EUROPEAN CRACKING CATALYSTS PRODUCERS ASSOCIATION - FCC Equilibrium Catalyst (including FCC catalyst fines) ds safe reuse/rework outlets in Europe. Belgica – Bruxelas: European Chemical Industry Council, Janeiro 2006.
- [51] FURIMSKY, E. - Review - Spent refinery catalysts: environment, safety and utilization. 30ª ed.: Catalysis Today - Canada, IMAF Group, 1996. pp 223-286.
- [52] SU, N. et al. - Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for. 30ª ed.: Cement and Concrete Research, 2000. pp 1773-1783.
- [53] SCHMITT, R. – FCC caralyst finds three safe reuse outlets in europe. Oil & Gas Journal.
- [54] GEADA, R.; COSTA, C. - Efeito de incorporação de resíduo da industria petrolífera nas propriedades mecânicas de argamassas. 4º Congresso Português de argamassas e ETICS.
- [55] GALP ENERGIA, Portugal. Disponível em: <<http://www.galpenergia.com/PT/agalpenergia/os-nossos-negocios/Refinacao-Distribuicao/ARL/Refinacao/Paginas/Home.aspx>>. [Acedido em 21 6 2012].
- [56] AL-JABRI, k. et al - Potential use of FCC spent catalyst as partial replacement of cement or sand in cement mortars. Constrution and Building Materials, ELSERVIER, 2012.
- [57] PAYÁ, J. et al. - Outstanding aspects on the use of spent FCC catalyst in binders. Espanha Madrid: 1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco – Energy, Novembro 2009.
- [58] LIU, X. et al. - Zeolite Y synthesized with FCC spent catalyst fines: particle size effect on catalytic reactions. China: University of Petroleum, DOI 10.1007/s10934-011-9534-1, 2012. pp 133-139.
- [59] ANTIOHOS, S; CHOULIARA, E.; TSIMAS, S. – Re-use of spent catalyst from oil-cracjing refineries as supplementary cementing material. 2ª ed.: Chima particoulogy v.4, 2006.

pp 73-76.

- [60] PAYÁ, J. et al - Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking. 31ª ed.: Cement and Concrete Research, 2001. pp 57-61.
- [61] HSU, K. et al. - Oil cracking waste catalyst as an active pozzolanic material for superplasticized mortars. 31ª ed.: Cement and Concrete Research , 2001. pp 1815-1820.
- [62] CHEN, H.; TSENG, Y.; HSU, K. - Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars. 26ª ed.: Cement and Concrete Composites, 2004. pp 657-664.
- [63] CHINDAPRASIRT, P.; HOMWUTTIWONG, S.;SIRIVIVATNANON, V. - Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. Cement and Concrete Research, 2004. pp 1087-1092.
- [64] CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; SINSIRI, T. - Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete*, 2005. pp 425-428.
- [65] NP EN 196-1. Outubro 2006, Métodos de Ensaio de Cimentos - Determinação das resistências mecânicas. 3ª Edição, Caparica: IPQ.
- [66] EN 1015-18. Dezembro 2012, Methods of test for mortar masonry - Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, Brussels: European committee for standardization (CEN).
- [67] EN 1015-12. Fevereiro 2000, Methods of test for mortar for masonry- Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates, Brussels: European Commiitte for standardization (CEN).
- [68] EN 1015-3. Fevereiro 1999, Methods of test mortar of masonry - Determination of cinsistence of fresh mortal (by flow table), Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
- [69] GONÇALVES, A. - Estudo da influência dos factores de aplicação no desempenho de argamassas de revestimento recorrendo a tecnicas de ensaio in-situ. Lisboa: Instituto Superior Tecnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [70] EN 1015-6. Outubro 1998, Methods of test for mortar for masonry - Determination of bulk density of fresh mortar, Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
- [71] EN 1015-7. Outubro, Methods of test for mortar for masonry - Determination of air content of fresh mortar, Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

- [72] NP EN 12504-4. Outuro 2007, Ensaios do betão nas estruturas - Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons, Caparica:IPQ.
- [73] NEPOMUCEANO, M. - Ensaios nao destrutivos em betão. Covilhã: Universidade da beira interior, 1999. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [74] GOOGLE docs, Portugal. Disponível em: [https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:fRLr5-0GPIMJ:sigarra.up.pt/feup/conteudos\\_service.conteudos\\_cont?pct\\_id%3D14390%26pv\\_cod%3D35GoHdmanvIq+ensaio+ultra-sons&hl=pt-PT&gl=pt&pid=bl&srcid=ADGEEsiwThApESeWj8DksOOWmOkYQKf2V7CIHTEzqneSZrN95TfrMCaDUevG74](https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:fRLr5-0GPIMJ:sigarra.up.pt/feup/conteudos_service.conteudos_cont?pct_id%3D14390%26pv_cod%3D35GoHdmanvIq+ensaio+ultra-sons&hl=pt-PT&gl=pt&pid=bl&srcid=ADGEEsiwThApESeWj8DksOOWmOkYQKf2V7CIHTEzqneSZrN95TfrMCaDUevG74)>. [Acedido em 15 9 2012].
- [75] E393. Maio 1993, Betões - Determinação da absorção de água por capilaridade, Portugal: Documentação Normativa - Especificações LNEC ISBN 0870-8592.
- [76] PAN, P. - Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. Cement and Concrete, 2003. pp 1749 - 1754.
- [77] LI, G.; WU, X. - Influence of fly ash and its mean particle size on certain engineering properties of cement composite mortars. Cement and Concrete, 2005. pp 1128- 1134.
- [78] SAID-MANSOUR, E. et al - Influence of Fineness of Active Addition on Concrete Equivalent Mortar Properties. ICCBT , 2008, pp 539-547.
- [79] BRAGA, M. - Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão - Efeito filler e pozolânico. Lisboa: Instituto Superior Tecnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [80] PENAS,F. - Argamassas de cal hidraulica para revestimentos de parede. Lisboa: Instituto Superior Tecnico – Univerdade Técnica de Lisboa, 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [81] AGOSTINHO, A. - Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea. Lisboa: Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia civil
- [82] MACIEL, L.; BARROS,M.; SABBATINI, F. - Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas exteriores e tetos. Brasil - São Paulo, 1998.
- [83] SILVA, D. - Optimização de caldas de cimento para trabalhos de injeção em Geotecnia. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.

- [84] MARQUES, A. - Argamassas de cal aérea com adição de cinzas de casca de arroz - Influência das condições de cura. Lisboa: Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Militar.
- [85] ASTM C311-07, Standar Test Methods for sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolanic activity for Use in Portland- Cement Concrete. EUA: American Society for Testing and Materials International, 2007.
- [86] CUNHA, A.; et al. - Estudo por termografia da influência do tamanho de partículas de catalisador de equilíbrio em sua actividade pozolânica. Brasil – Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [87] VIEIRA, A. - Caracterização de Revestimentos Exteriores Através de Ensaio de Arrancamento por Tracção. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- [88] NAKAKURA, E.; MUNHOS, F.; BATTAGIN, A. - Evolução da aderência em sistemas de revestimento de argamassa. Brasil – Curitiba: VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, Maio 2009.





## **ANEXO A – CIMENTOS CORRENTES**

A.1.27 Produtos da série de cimentos correntes (Extraído de: NP EN 197-1:2001)



## A.1.27 Produtos da série de cimentos correntes (Extraído de: NP EN 197-1:2001)

Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente)		Composição (porcentagem em massa <sup>1)</sup> )										Constituintes adicionados máximos
		Constituintes principais										
		Clinker K	Fosfor de alto ferro S	Sílica de ferro D*	Porcelana		Cruza volante		Nítrio oxidado T	Cálculo		
natural P	natural calcinado Q				silícios a V	calcário W	L	LL				
Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de escória	CEM III/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de sílica de fumo	CEM III/A-D	90-94	-	4-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de porcelana	CEM III/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de cruza volante	CEM III/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	CEM III/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	CEM III/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
Cimento Portland de nítrio oxidado	CEM III/A-T	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	CEM III/B-T	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
Cimento Portland de calcário	CEM III/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM III/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	CEM III/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	CEM III/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
Cimento Portland composto <sup>2</sup>	CEM III/A-M	80-94	<----- 6-20 ----->								0-5	
	CEM III/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->								0-5	
Cimento de alto ferro	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B	20-34	64-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento porcelânico <sup>3</sup>	CEM IV/A	65-89	-	<----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5
	CEM IV/B	45-64	-	<----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5
Cimento composto <sup>4</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5
	CEM V/B	20-38	31-50	-	<----- 31-50 ----->			-	-	-	-	0-5



## **ANEXO B – EXECUÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL**

### B.1. Calendarização das atividades



# MARÇO 2012

Semanas de Pré-campanha experimental

E.F – Ensaios no estado fresco  
 R.M – Ensaio de resistência mecânica  
 U.S – Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas  
 Cap – Provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade

Fevereiro de 2012							Abril de 2012						
seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom
		1	2	3	4	5							1
6	7	8	9	10	11	12	2	3	4	5	6	7	8
13	14	15	16	17	18	19	9	10	11	12	13	14	15
20	21	22	23	24	25	26	16	17	18	19	20	21	22
27	28	29					23	24	25	26	27	28	29
							30						

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
27	28	29	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
13:00 - 100C 14:00 - 100C 15:00 - 100C 15:00 - 100C_SP 16:00 - 100C_SP 18:00 - 100C_SP	09:00 - 5F_M2_SP 10:00 - 5F_M2_SP 11:00 - Desmoldar 100C 12:00 - 5F_M2_SP 13:00 - Desmoldar 100C 14:00 - Desmoldar 100C 15:00 - Desmoldar 100C_SP 19:00 - 10F_M2_SP 20:00 - 10F_M2_SP	08:00 - Desmoldar 5F_M2_SP 10:00 - 15F_M2_SP 11:00 - 15F_M2_SP 12:00 - Desmoldar 5F_M2_SP 13:00 - R.M+US - 100C 14:00 - 15F_M2_SP 15:00 - 5F_M2_SP 16:00 - R.M+US- 100C_SP 17:00 às 19:00 - Desmoldar 10F_M2_SP 20:00 - 5F_M1_SP 21:00 - 5F_M1_SP	09:00 às 13:00 - Desmoldar 15F_M2_SP 13:00 - Desmoldar 5F_M1_SP 18:00 às 20:00 - Desmoldar 5F_M1_SP	→ Testar ensaio de aderência → Fazer doses para a realização da campanha experimental – argamassas com teor de SP constante		
12	13	14	15	16	17	18
10:00 - 100C-1dose E.F 11:00 - 100C-1dose 2d 12:00 - 100C-3dose -E.F + 2d 13:00 - R.M+US 100C 16:00 - R.M+US 100C_SP	12:00 - R.M+US 5F_M2_SP 18:00 - R.M+US 10F_M2_SP	10:00 - R.M+US 15F_M2_SP 11:00 - R.M+US 100C-1dose 12:00 - R.M+US 100C-3doses 15:00 - R.M+US 5F_M1_SP		→ Testar ensaio de aderência → Fazer doses para a realização da campanha experimental – argamassas com teor de SP constante		
19	20	21	22	23	24	25
Realização de estudo para determinar a quantidade de SP a adicionar a cada argamassa de modo a atingir a consistência constante						
26	27	28	29	30	31	1
10:03 - 100C - E.F+2d+7d 10:54 - 100C - E.F+28d+56d 11:33 - 100C- 28d_B+90d+cap 14:09 - 100C_SP- E.F+2d+7d 14:59 - 100C_SP - E.F+28d+56d 15:36 - 100C_SP - 28d_B+90d+cap	08:00 - Desmoldar 100C 10:08 - 5F_M2_SP- E.F+2d+7d 10:54 - 5F_M2_SP- E.F+28d+56d 12:00 - Desmoldar 100C 14:00 - Desmoldar 100C_SP 15:28 - 5F_M2_SP-28d_B+90d+ cap 16:10 - 10F_M2_SP- E.F+28d+56d 16:50 - 10F_M2_SP -E.F+2d+7d 17:22 - 10F_M2_SP -28d_B+90d+ cap	08:00 - Desmoldar 5F_M2_SP + cap 100C 10:00 - R.M+U.S - 100C - 2d 10:55 - 15F_M2_SP -E.F+2d+7d 11:40 - 15F_M2_SP- E.F+28d+56d 12:15 - 15F_M2_SP -28d_B+90d+ cap 14:00 - R.M+U.S - 100C_SP- 2d 15:00 - Desmoldar 5F_M2_SP + cap 100C_SP 16:30 - Desmoldar 10F_M2_SP	09:00 - Desmoldar 15F_M2_SP 10:00 - Desmoldar 15F_M2_SP 11:00 - R.M+U.S - 5F_M2_SP - 2d 12:00 - Desmoldar 15F_M2_SP 16:00 - Desmoldar cap. 5F_M2_SP e 10F_M2_SP 16:50 - R.M+U.S - 10F_M2_SP – 2d	10:07 - Aderência 5F_M2_SP v1 11:00 - R.M+U.S - 15F_M2_SP - 2d 12:00 - Desmoldar cap 15F_M2_SP 14:12 - Aderência 10F_M2_SP v1		

# ABRIL 2012

E.F – Ensaios no estado fresco  
 R.M – Ensaio de resistência mecânica  
 U.S – Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas  
 Cap – Provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade

Março de 2012							Maio de 2012						
seq	ter	qua	qui	sex	sáb	dom	seq	ter	qua	qui	sex	sáb	dom
			1	2	3	4							
5	6	7	8	9	10	11	7	8	9	10	11	12	13
12	13	14	15	16	17	18	14	15	16	17	18	19	20
19	20	21	22	23	24	25	21	22	23	24	25	26	27
26	27	28	29	30	31		28	29	30	31			

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8
09:15 - 5F_M1_SP- E.F+2d+7d 10:00 - R.M+U.S - 100C - 7d 11:05 - 5F_M1_SP- E.F+28d+56d 11:53 - 5F_M1_SP-28d_B+90d+ cap 12:33 - 15F_M1_SP-28d_B+90d+ cap 14:00 - R.M+U.S - 100C_SP - 7d 14:50 - 10F_M1_SP- E.F+2d+7d 15:25 - 10F_M1_SP-28d_B+90d+ cap 15:57 - 10F_M1_SP- E.F+28d+56d 16:34 - 15F_M1_SP- E.F+28d+56d	08:00 - Desmoldar 5F_M1_SP 10:10 - 15F_M1_SP- E.F+2d+7d 10:46 - 5F_SP- E.F+2d+7d 11:30 - R.M+U.S - 5F_M2_SP - 7d 12:05 - 5F_SP-28d_B+90d+ cap 14:00 - Desmoldar 10F_M1_SP 15:00 - Desmoldar 10F_M1_SP 16:00 - Desmoldar 15F_M1_SP 17:00 - R.M+U.S - 10F_M2_SP - 7d	08:00 - Desmoldar 15F_M1_SP 09:00 - R.M+U.S - 5F_M1_SP - 2d 10:00 - Desmoldar 15F_M1_SP + cap 5F_M1_SP 11:00 - R.M+U.S - 15F_M2_SP - 2d 11:35 - 5F_SP - E.F+28d+56d 14:00 - Desmoldar cap 10F_M1_SP 15:00 - R.M+U.S - 10F_M1_SP - 2d	10:00 - R.M+U.S - 15F_M1_SP - 2d 11:00 - R.M+U.S - 5F_SP - 2d 11:22 - Ensaio aderência 15_M1_SP V1 12:30 - Ensaio aderência 10_M1_SP V1			
9	10	11	12	13	14	15
09:00 - R.M+U.S - 5F_M1_SP - 7d 10:04 - 5F_SP- E.F+2d+7d 10:50 - 5F_SP- E.F+28d+56d 11:24 - 5F_SP-28d_B+90d+ cap 12:04 - 15F_SP-28d_B+90d+ cap 13:37 - 15F_SP- E.F+28d+56d 13:59 - 15F_SP- E.F+2d+7d 14:30 - R.M+U.S - 10F_M1_SP - 7d 15:07 - 5F_M2_C- E.F+28d+56d	08:00 - Desmoldar 5F_SP 10:20 - R.M+U.S - 15F_M1_SP - 7d 11:05 - 5F_M2_C- E.F+2d+7d 11:40 - 5F_M2_C-28d_B+90d+ cap 12:20 - R.M+U.S - 5F_SP - 7d 13:30 - Desmoldar 15F_SP 16:04 - 10F_M2_C- E.F+2d+7d	08:00 - Desmoldar 5F_M2_C 09:00 - Desmoldar cap 10F_SP e 15_SP 09:45 - R.M+U.S - 10F_SP - 2d 11:24 - 10F_M2_C- E.F+2d+7d 11:56 - 10F_M2_C-28d_B+90d+ cap 12:33 - 10F_M2_C- E.F+28d+56d 14:15 - R.M+U.S - 15F_SP - 2d 15:03 - 15F_M2_C-28d_B+90d+ cap 16:00 - Desmoldar 10F_M2_C 16:40 - 15F_M2_C- E.F+2d+7d	09:00 - Desmoldar 10F_M2_C 11:05 - R.M+U.S - 5F_M2_C - 2d 11:40 - Desmoldar cap 5F_M2_C 16:30 - R.M+U.S - 10F_M2_C - 2d	12:00 - Desmoldar cap 10F_M2_C 14:00 - Desmoldar cap 15F_M2_C 16:20 - R.M+U.S - 15F_M2_C - 2d		
16	17	18	19	20	21	22
08:04 - 5F_M1_C- E.F+28d+56d 08:35 - 5F_M1_C-28d_B+90d+ cap 09:05 - 5F_M1_C- E.F+2d+7d 09:45 - R.M+U.S - 10F_SP - 7d 11:00 - CIARGA - VER ENSAIO 14:15 - R.M+U.S - 15F_SP - 7d 14:55 - 10F_M1_C- E.F+2d+7d 15:37 - 10F_M1_C- E.F+28d+56d 16:07 - 10F_M1_C-28d_B+90d+ cap 16:42 - 15F_M1_C- E.F+28d+56d 17:16 - 15F_M1_C-28d_B+90d+ cap	08:00 - Desmoldar 5F_M1_C 09:47 - 15F_M1_C- E.F+2d+7d 11:05 - R.M+U.S - 5F_M2_C - 7d 14:00 - Desmoldar 10F_M1_C 15:30 - Desmoldar 15F_M1_C 16:30 - R.M+U.S - 10 F_M2_C - 7d	08:50 - R.M+U.S - 5F_M1_C - 2d 10:00 - Desmoldar 15F_M1_C e cap 5F_M1_C 10:59 - 5F_C-28d_B+90d+ cap 11:35 - 5F_C- E.F+28d+56d 12:05 - 5F_C- E.F+2d+7d 14:00 - Desmoldar cap 10F_M1_C e 15F_M1_C 14:40 - R.M+U.S - 10F_M1_C - 2d 15:30 - R.M+U.S - 15F_M2_C - 7d 16:37 - 10F_C- E.F+28d+56d 17:10 - 10F_C- E.F+2d+7d 17:42 - 10F_C-28d_B+90d+ cap	10:00 - R.M+U.S - 15F_M1_C - 2d 11:00 - Desmoldar 5F_C 15:00 - Desmoldar 10F_C 16:25 - 100C_SP -1dose - 91d	09:00 - Desmoldar cap 10F_C 10:25 - Aderência 100C 11:05 - Aderência 100C_SP 11:45 - Aderência 5F_M2_SP 12:00 - R.M+U.S - 5F_C - 2d 14:45 - Aderência 10F_M2_SP 15:15 - Aderência 15F_M2_SP 15:40 - Aderência 5F_M1_SP 16:00 - Desmoldar cap 10F_C 16:40 - R.M+U.S - 10F_C - 2d		
23	24	25	26	27	28	29
09:00 - R.M+U.S - 5F_M1_C - 7d 10:20 - 100C_SP -1dose - 28d 10:40 - 100C_SP -1dose - 7d 11:00 - R.M+U.S - 100C - 28d 11:30 - R.M+U.S - 100C - 28d-B 14:55 - R.M+U.S - 10F_M1_C - 7d 15:00 - R.M+U.S - 100C_SP - 28d 15:30 - R.M+U.S - 100C_SP - 28d-B	09:47 - R.M+U.S - 15F_M1_C - 7d 10:54 - R.M+U.S - 5F_M2_SP - 28d 15:30 - R.M+U.S - 5F_M2_SP - 28d-B 16:50 - R.M+U.S - 10F_M2_SP - 28d 17:20 - R.M+U.S - 10F_M2_SP - 28d-B	11:40 - R.M+U.S - 15F_M2_SP - 28d 12:00 - R.M+U.S - 5F_C - 7d 12:30 - R.M+U.S - 15F_M2_SP - 28d-B 17:10 - R.M+U.S - 10F_C - 7d	09:00 - Aderência 10F_M1_SP 10:00 - Aderência 5F_SP 10:30 - Aderência 10F_SP 11:00 - Aderência 15F_SP 11:30 - Aderência 5F_M2_C 12:00 - Aderência 10F_M2_C			
30	1	2	3	4	5	6
10:40 - R.M+U.S - 100C_SP -1dose - 7d 11:00 - R.M+U.S - 5F_M1_SP - 28d 12:00 - R.M+U.S - 5F_M1_SP - 28d-B 12:30 - R.M+U.S - 15F_M1_SP - 28d-B 15:25 - R.M+U.S - 10F_M1_SP - 28d 15:57 - R.M+U.S - 10F_M1_SP - 28d-B 16:35 - R.M+U.S - 15F_M1_SP - 28d-						

# MAIO 2012

E.F – Ensaios no estado fresco  
 R.M – Ensaio de resistência mecânica  
 U.S – Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas  
 Cap – Provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade

Abril de 2012							Junho de 2012						
seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom
						1					1	2	3
2	3	4	5	6	7	8	4	5	6	7	8	9	10
9	10	11	12	13	14	15	11	12	13	14	15	16	17
16	17	18	19	20	21	22	18	19	20	21	22	23	24
23	24	25	26	27	28	29	25	26	27	28	29	30	
30													

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
30	1	2	3	4	5	6
	12:05 - R.M+U.S - 5F_SP – 28d-B	11:35 - R.M+U.S - 5F_SP – 28d	09:00 - Aderência 15F_M2_C 10:00 - Aderência 5F_M1_C 10:30 - Aderência 10F_M1_C 11:00 - Aderência 15F_M1_C 11:30 - Aderência 5F_C 12:00 - Aderência 10F_C			
7	8	9	10	11	12	13
10:50 - R.M+U.S - 10F_SP – 28d 11:24 - R.M+U.S - 10F_SP – 28d-B 12:05 - R.M+U.S - 15F_SP – 28d-B 13:40 - R.M+U.S - 15F_SP – 28d 15:00 - R.M+U.S - 5F_M2_C – 28d	11:40 - R.M+U.S - 5F_M2_C – 28d-B	11:30 - R.M+U.S - 10F_M2_C – 28d 12:00 - R.M+U.S - 10F_M2_C – 28d-B 12:45 - R.M+U.S - 15F_M2_C – 28d 15:00 - R.M+U.S - 15F_M2_C – 28d-B				
14	15	16	17	18	19	20
08:00 - R.M+U.S - 5F_M1_C – 28d 08:40 - R.M+U.S - 5F_M1_C – 28d-B 15:30 - R.M+U.S - 10F_M1_C – 28d 16:10 - R.M+U.S - 10F_M1_C – 28d-B 17:00 - R.M+U.S - 15F_M1_C – 28d 18:00 - R.M+U.S - 15F_M1_C – 28d-B	→ CIARGA – <u>COLAR BOLACHAS</u> METÁLICAS: ▪ 10F_M1_SP; 5F_SP ▪ 10F_SP; 15F_SP ▪ 5F_M2_C ▪ 10F_M2_C ▪ 15F_M2_C ▪ 5F_M1_C ▪ 10F_M1_C ▪ 15F_M1_C; 5F_C ▪ 10F_C	11:00 - R.M+U.S - 5F_C – 28d-B 11:30 - R.M+U.S - 5F_C – 28d 16:30 - R.M+U.S - 10F_C – 28d 17:40 - R.M+U.S - 10F_C – 28d-B	10:10 - Aderência 5F_M1_SP –V2 10:30 - Aderência 10F_M1_SP – V2 10:40 - Aderência 15F_M2_SP –V2 11:40 - Aderência 5F_M2_C –V2 10:50 - Aderência 15F_M1_SP – V2 11:20 - Aderência 10F_SP – V2 12:55 - Aderência 5F_SP_chapisco 13:10 - Aderência 10F_SP_chapisco 13:30 - Aderência 15F_SP – chapisco 14:00 - Aderência 5F_C –V2	→ CIARGA – <u>REALIZAR ENSAIO</u> ADERÊNCIA: ▪ 100C ▪ 100C_SP ▪ 5F_M2_SP ▪ 10F_M2_SP ▪ 15F_M2_SP ▪ 5F_M1_SP		
21	22	23	24	25	26	27
10:20 - R.M+U.S - 100C_SP -1dose – 28d 11:00 - R.M+U.S - 100C - 56d 15:00 - R.M+U.S - 100C_SP - 56d 16:00 - 100C_SP -1dose – 56d 17:00 - 100C_SP -1dose – 2d	11:00 - R.M+U.S - 5F_M2_SP – 56d 16:50 - R.M+U.S - 10F_M2_SP – 56d	11:40 - R.M+U.S - 15F_M2_SP – 56d 17:00 - R.M+U.S - 100C_SP -1dose – 2d	→ CIARGA – <u>COLAR BOLACHAS</u> METÁLICAS : ▪ 15F_M2_C; 5F_M1_C ▪ 10F_M1_C; 15F_M1_C ▪ 5F_C; 10F_C → CIARGA – <u>REALIZAR ENSAIO</u> ADERÊNCIA: ▪ 10F_M1_SP; 5F_SP ▪ 10F_SP; 15F_SP ▪ 5F_M2_C; 10F_M2_C			
28	29	30	31	1	2	3
11:00 - R.M+U.S - 5F_M1_SP – 56d 15:30 - R.M+U.S - 10F_M1_SP – 56d 16:30 - R.M+U.S - 15F_M1_SP – 56d		11:30 - R.M+U.S - 5F_SP – 56d	→ CIARGA – <u>REALIZAR ENSAIO</u> ADERÊNCIA: ▪ 15F_M2_C ▪ 5F_M1_C ▪ 10F_M1_C ▪ 15F_M1_C ▪ 5F_C ▪ 10F_C			

# JUNHO 2012

E.F – Ensaios no estado fresco  
 R.M – Ensaio de resistência mecânica  
 U.S – Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas  
 Cap – Provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade

Maio de 2012

seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

Julho de 2012

seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
28	29	30	31	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
10:50 - R.M+U.S -10F_SP - 56d 13:40 - R.M+U.S -15F_SP - 56d 15:10 - R.M+U.S -5F_M2_C - 56d	→ CIARGA – COLAR BOLACHAS METÁLICAS: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5F_M1_SP –V2</li> <li>▪ 10F_M1_SP –V2</li> <li>▪ 15F_M2_SP –V2</li> <li>▪ 5F_M2_C –V2</li> <li>▪ 15F_M1_SP – V2; 10F_SP – V2</li> <li>▪ 5F_SP_chapisco</li> <li>▪ 10F_SP_chapisco</li> <li>▪ 15F_SP – chapisco;5F_C –V2</li> </ul>	11:30 - R.M+U.S -10F_M2_C - 56d 12:30 - R.M+U.S -15F_M2_C - 56d				
11	12	13	14	15	16	17
08:00 - R.M+U.S -5F_M1_C - 56d 15:00 - R.M+U.S -10F_M1_C - 56d 16:40 - R.M+U.S -15F_M1_C - 56d		15:30 - R.M+U.S -5F_C - 56d 17:30 - R.M+U.S -10F_C - 56d	→ CIARGA – REALIZAR ENSAIO ADERÊNCIA: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5F_M1_SP –V2</li> <li>▪ 10F_M1_SP –V2</li> <li>▪ 15F_M2_SP –V2</li> <li>▪ 5F_M2_C –V2</li> <li>▪ 15F_M1_SP – V2; 10F_SP – V2</li> <li>▪ 5F_SP_chapisco</li> <li>▪ 10F_SP_chapisco</li> <li>▪ 15F_SP – chapisco;5F_C –V2</li> </ul>	Fazer provetes para ensaio de aderência – repetições: 12:00 - 5_M2_SP – V3 12:23 - 10_M2_SP –V3 12:40 - 15F_SP – V2 14:45 - 10F_M2_C – V2 15:00 5F_C – V2 15:23 - 10F_C – V2 16:00 - 5F_C – V2 chapisco		
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	1
11:30 - R.M+U.S -100C - 91d 15:30 - R.M+U.S -100C_SP - 91d	15:30 - R.M+U.S -5F_M2_C - 91d 17:30 - R.M+U.S -10F_M2_C - 91d	12:15 - R.M+U.S -15F_M2_C - 91d				

# JULHO 2012

E.F – Ensaios no estado fresco  
 R.M – Ensaio de resistência mecânica  
 U.S – Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas  
 Cap – Provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade

Junho de 2012							Agosto de 2012						
seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom
				1	2	3			1	2	3	4	5
4	5	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	11	12
11	12	13	14	15	16	17	13	14	15	16	17	18	19
18	19	20	21	22	23	24	20	21	22	23	24	25	26
25	26	27	28	29	30		27	28	29	30	31		

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
25	26	27	28	29	30	1
2	3	4	5	6	7	8
12:00 - R.M+U.S -5F_M1_SP - 91d 12:30 - R.M+U.S -15F_M1_SP - 91d 16:00 - R.M+U.S -10F_M1_SP - 91d	10:00 – 100C_SP 1dose – E.F 12:00 - R.M+U.S -5F_SP - 91d			→ CIARGA – COLAR BOLACHAS METÁLICAS: ▪ 5_M2_SP – V3 ▪ 10_M2_SP – V3 ▪ 15F_SP – V2 ▪ 10F_M2_C – V2 ; 5F_C – V2 ▪ 10F_C – V2 ▪ 5F_C – V2 chapisco		
9	10	11	12	13	14	15
11:30 - R.M+U.S -10F_SP - 91d 12:00 - R.M+U.S -15F_SP - 91d 14:30 - R.M+U.S - 100C_SP 1dose - 56d	11:40 - R.M+U.S -5F_M2_C - 91d	12:00 - R.M+U.S -10F_M2_C - 91d 15:00 - R.M+U.S -15F_M2_C - 91d		→ CIARGA – REALIZAR ENSAIO ADERÊNCIA: ▪ 5_M2_SP – V3 ▪ 10_M2_SP – V3 ▪ 15F_SP – V2 ▪ 10F_M2_C – V2 ; 5F_C – V2 ▪ 10F_C – V2 ▪ 5F_C – V2 chapisco		
16	17	18	19	20	21	22
08:30 - R.M+U.S -5F_M1_C - 91d 16:00 - R.M+U.S -10F_M1_C - 91d 17:15 - R.M+U.S -15F_M1_C - 91d		11:00 - R.M+U.S -5F_C - 91d 17:40 - R.M+U.S -10F_C - 91d	16:30 - R.M+U.S - 100C_SP 1dose - 91d			
23	24	25	26	27	28	29
30	31	1	2	3	4	5



## **ANEXO C – FICHAS TÉCNICAS**

C.1. Cimento Portland (CEM1 42,5R)

C.2. Agregado

C.3. Superplastificante

C.4. Impermeabilizante

C.5. Cola



## C.1. CIMENTO PORTLAND



## 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<sub>3</sub>)  $\leq 4,0\%$
- Clorretos (Cl)  $\leq 0,10\%$

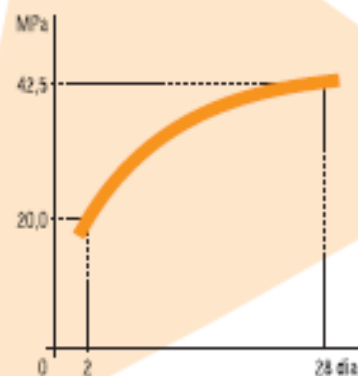
#### Físicas

- 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
- ▶ **Órãs de injeção de uso generalizado**

### ▶ Acondicionamento



**Palete**  
49 Sacos de 35 kg - 1715 kg



**Paletão**  
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. Serrano Filipe, 8 - Edifício CIMPOR - 2800-026 PAREDE VELHO  
Tl. 21 940 80 02 - Fax: 21 940 87 50

**ÁREA TÉCNICO-COMERCIAL**  
Av. Serrano Filipe, 8 - Edifício CIMPOR - 2800-026 PAREDE VELHO  
Tl. 21 940 80 02 - Fax: 21 940 87 54

**ENCOMENDAS, CONTROLO DE VENDAS E CRÉDITO**  
S. Pedro Filiz - Mira - Apartado 1023 - 4660-029 OMEGAS  
Tl. 22 965 80 00 - Fax: 22 967 18 28

www.cimpor-portugal.pt  
Domercial@imp.com

## C.2. AGREGADO



## 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

**SABLE NORMALISE CEN CERTIFIE  
CONFORME EN 196-1  
SABLE NORMALISE ISO  
CONFORME ISO 679**

Contrôle 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

**Méthodes d'essais des ciments**  
Sable pour mesure des résistances mécaniques

**1- CARACTERISTIQUES**

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondi. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\,350 \pm 5$  g.

Les livraisons se font à l'unité carton de 16 sachets pesant 21.6 kg et sur palette de 2 à 54 cartons, protégés par une housse en polyéthylène (transport routier) ou en carton renforcé (transport maritime).

**2- CONTROLES**



La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 (§ 5) et ISO 679 : 2009 (§ 5).

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	$99 \pm 1$
0.16	$87 \pm 5$
0.50	$67 \pm 5$
1.00	$33 \pm 5$
1.60	$7 \pm 5$
2.00	0


Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 (§ 11) et ISO 679 : 2009 (§ 11).

**3- CONFORMITE**

La conformité à la norme est contrôlée par le L.E.M.V.P. (Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris), 4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy - 75014 PARIS  
 Le certificat de conformité à la norme Européenne est délivré par l'AFNOR (Association Française de Normalisation), 11 Rue Francis de Pressensé – 93571 La Plaine Saint Denis Cédex.

S.N.L. fondée en 1916 – SAS capital 250 000 € – NIF FR 93 876 758 257 – SIRET 936 758 257 00025 APE 2613Z  
 Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CIMENTS





N° 1996/6027d

# Certificat

Certificate

AFNOR Certification certifie que le système de management mis en place par :  
AFNOR Certification certifies that the management system implemented by:

## SOCIETE NOUVELLE DU LITTORAL

pour les activités suivantes :  
for the following activities:

**EXTRACTION ET PREPARATION DE SABLE NORMALISE "CEN EN 196-1".  
PREPARATION DE SABLES ET MATERIAUX SUIVANT DES CRITERES SPECIFIQUES.  
REALISATION DE MATERIAUX DE REFERENCE COMME ETALON DE LABORATOIRE.**

**EXTRACTION AND PREPARATION OF "CEN EN 196-1" STANDARD SAND.  
PREPARATION OF SANDS AND MATERIALS ACCORDING TO SPECIFIC CRITERIA.  
MANUFACTURING OF REFERENCE MATERIALS TO BE USED  
AS A LABORATORY STANDARD.**

a été évalué et jugé conforme aux exigences requises par :  
has been assessed and found to meet the requirements of:

### ISO 9001 : 2008

et est déployé sur les sites suivants :  
and is developed on the following locations:

**Zone Artisanale BP 9 FR-11370 LEUCATE**

Seul le certificat électronique, consultable sur [www.afnor.org](http://www.afnor.org), est le seul instrument de la certification de l'organisme.  
Associations COFRAC et AFAQ. Toute demande de renseignements sur [www.afnor.org](http://www.afnor.org), COFRAC, information P#49977. Siège central AFNOR Certification, 11 rue Francis de Pressensé, 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex, France. Téléphone : +33 (0)1 41 62 80 00. Fax : +33 (0)1 49 17 90 00. AFAQ est une marque déposée. / AFAQ is a registered trademark. CERTIF 11/2008 4/20/2011

Ce certificat est valable à compter du (année/mois/jour)  
This certificate is valid from (year/month/day)

**2011-04-15**

Jusqu'au  
Until

**2014-04-14**



Directrice Générale d'AFNOR Certification

Managing Director of AFNOR Certification

F. MÉAUX

001-2611001 - 6

## C.3. SUPERPLASTIFICANTE

Construction	<p>Ficha de Produto          Edição de Abril de 2011          Nº de identificação: 01.111          Versão nº 1          SikaPlast® 898</p>	
		
	<p><b>SikaPlast® 898</b>          Powered by ViscoCrete®</p> <p>Superplastificante de elevado desempenho</p>	
	<b>Descrição do produto</b>	SikaPlast® 898 é um superplastificante forte redutor de água para betão.
	<b>Utilizações</b>	<p>SikaPlast® 898 permite obter uma muito forte plastificação e uma longa manutenção da consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.</p> <p>SikaPlast® 898 permite a fabricação de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Betões plásticos a fluidos.</li> <li>■ Betões com diferentes razões A/C.</li> <li>■ Betão bombeado para longas distâncias.</li> <li>■ Betão com agregados britados.</li> <li>■ Prefabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ.</li> </ul> <p>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.</p>
	<b>Características/Vantagens</b>	<p>SikaPlast® 898 é um superplastificante forte redutor de água que confere ao betão as seguintes propriedades:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Excelente trabalhabilidade conjugada com o elevado desempenho a nível do desenvolvimento das resistências.</li> <li>■ Alta redução de água, conforme a dosagem e a composição; daí resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compactidade elevada e de permeabilidade muito baixa.</li> <li>■ Boas resistências iniciais e finais.</li> <li>■ Excelente performance quer usado sozinho como combinado com outros adjuvantes.</li> <li>■ Maior robustez contra variações nos agregados e/ou diferentes tipos de cimento.</li> <li>■ Bom aspecto da superfície na desformagem</li> <li>■ Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em prefabricação, com bom desenvolvimento de resistências.</li> </ul> <p>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-estorçado.</p>
	<b>Certificados/Boletins de Ensaio</b>	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.
<b>Dados do produto</b>		
<b>Aspecto / Cor</b>	Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.	
<b>Fornecimento</b>	214 kg (200 litros); 1070 kg (1 m <sup>3</sup> ); granel.	
		
<p>SikaPlast® 898 1/3</p>		

<b>Armazenagem e conservação</b>	O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada, a temperaturas entre +5 °C e +30 °C. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.
<b>Dados técnicos</b>	
<b>Base química</b>	Combinação de polycarboxilatos modificados, em solução aquosa.
<b>Massa volúmica</b>	1,07 ± 0,02 kg/dm <sup>3</sup> (a +23 ±2 °C)
<b>pH (23 ± 2°C)</b>	5,0 ± 1,0.
<b>Teor de sólidos</b>	32,0 ± 2,0 %.
<b>Teor em íões cloreto</b>	≤ 0,1%.
<b>Informação sobre o sistema</b>	
<b>Pormenores de aplicação</b>	
<b>Consumo / Dosagem</b>	Conforme o objectivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Dosagem corrente: 0,5% a 1,5% do peso do cimento.</li> <li>■ Dosagens especiais: 1,5% a 2,0% do peso do cimento.</li> </ul>
<b>Mistura</b>	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.
<b>Aplicação</b>	SikaPlast® 898 permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente 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.
<b>Compatibilidade</b>	SikaPlast® 898 pode ser combinado com os seguintes produtos: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sika® FerroGard® 901.</li> <li>■ Sika® Pump.</li> <li>■ Sika® Rapid</li> <li>■ Sikacrete®.</li> </ul> Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.
<b>Limpeza de ferramentas</b>	Limpar todas as ferramentas e equipamento com água imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.

<b>Importante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem ótima do adjuvante e sempre que se altere os componentes do betão ou a própria composição.</li> <li>■ Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se.</li> </ul> <p>Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.</p>
<b>Nota</b>	Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.
<b>Risco e segurança</b>	
<b>Medidas de segurança</b>	<p>Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.</p> <p>"O produto está seguro na Cº Seguro XI, Insurance Switzerland (Apólice nº CH00003018LJ054), e título de responsabilidade civil do fabricante".</p> <p>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 de 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 fim 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.</p>
<b>Marcação CE</b>	<p>A Norma Europeia EN 934-2:2003 "Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem" especifica as definições e os requisitos dos adjuvantes para uso no betão. Abrange adjuvantes para betão simples, armado e pré-estorçados usados no betão fabricado no local da obra, no betão pronto e no betão fabricado em centrais de produção de elementos prefabricados.</p> <p>Nesta norma os requisitos de desempenho aplicam-se a adjuvantes usados no betão de consistência normal. Eles podem não ser aplicáveis a adjuvantes para outros tipos de betão tais como betões meio secos e de consistência terra húmida.</p>



Sika Portugal, SA  
R. de Santarém, 113  
4400-262 V. N. Gaia  
Portugal

Tel. +351 22 377 69 00  
Fax +351 22 370 20 12  
www.sika.pt



Sika Plast® 060 3/3

## C.4. IMPERMEABILIZANTE

Construction


Ficha de Produto  
Edição de Abril de 2011  
Nº de identificação: 04.105  
Versão nº 1  
Icosit® K 101 TW

CE

## Icosit® K 101 TW

### Revestimento epoxi especial para contacto com água potável

<b>Descrição do produto</b>	Icosit® K 101 TW é um revestimento à base de resinas de epoxi, isento de solventes, com boa resistência química e mecânica, e fisiologicamente inofensivo após endurecimento.
<b>Utilizações</b>	Como revestimento espesso de protecção para: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reservatórios de água potável, tanques, cubas, condutas (enterradas ou não), etc. no domínio da indústria da água.</li> <li>■ Reservatórios em sistemas de aquacultura.</li> <li>■ Protecção de betão contra álcalis concentrados, ácidos não oxidantes, gorduras e óleos.</li> </ul>
<b>Características/ Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fácil de aplicar.</li> <li>■ Isento de solventes.</li> <li>■ Fisiologicamente inofensivo.</li> <li>■ Boa resistência química e mecânica.</li> <li>■ Aprovado para contacto com água potável.</li> </ul>
<b>Certificados/ Boletins de Ensaio</b>	O produto está conforme o Decreto-Lei nº 243/2001 de 5 de Setembro, no que respeita às exigências para materiais em contacto com a água destinada a consumo humano – Boletim de Ensaio nº 01/06/LAB da EPAL, de 10 de Janeiro de 2006. Está conforme com a norma NP EN 1504-2.
<b>Dados do produto</b>	
<b>Aspecto / Cor</b>	Branco. Quando exposto à radiação UV, a película pode amarelecer superficialmente, mas tal não afecta as características do revestimento.
<b>Fornecimento</b>	Conjuntos premedidos de 5 kg e 20 kg (A+B).
<b>Armazenagem e conservação</b>	O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.
<b>Dados técnicos</b>	
<b>Base química</b>	Resinas de epoxi.
<b>Massa volumica</b>	Componente A: aprox. 1,61 kg/dm <sup>3</sup> . Componente B: aprox. 0,98 kg/dm <sup>3</sup> . Mistura (A+B): aprox. 1,42 kg/dm <sup>3</sup> .
<b>Propriedades físicas / Mecânicas</b>	
<b>Resistência ao arrançamento</b>	Aprox. 3 N/mm <sup>2</sup> aos 28 dias (ruptura coesiva no betão).



Icosit® K 101 TW 14

xxiv

<b>Resistência</b>	
<b>Resistência Química</b>	Resiste a diversos agentes químicos. Consultar o Departamento Técnico ou a tabela de resistências do produto.
<b>Resistência Térmica</b>	Resiste a calor seco até aprox. +100 °C. Resiste a água quente até aprox. +40 °C (sem agressividade química associada).
<b>Informação sobre o sistema</b>	
<b>Estrutura do sistema</b>	2 x Icosit® K 101 TW (mín. 250 µm por camada).
<b>Particularidades de aplicação</b>	
<b>Consumo/ Dosagem</b>	Aprox. 0,35 – 0,4 kg/m <sup>2</sup> /camada, dependendo das características da base.
<b>Qualidade da base</b>	Bases minerais (betão, reboco): A base deve estar sólida, limpa, isenta de partículas soltas ou mal aderentes. A base poderá ter alguma humidade desde que a superfície se apresente mate.
<b>Preparação da base</b>	Aço: Aço decapado ao grau Sa 2 1/2, isento de pó, óleo e gordura.  Bases minerais (betão, reboco): Se a base apresentar elevada porosidade após preparação de superfície, é aconselhável proceder a um barramento prévio com Sikagard® 720 EpoCem®.
<b>Condições de aplicação/ Limitações</b>	
<b>Temperatura da base</b>	Mínima: +10 °C.
<b>Temperatura ambiente</b>	Mínima: +10 °C.
<b>Ponto de orvalho</b>	A temperatura da base deve estar no mínimo 3 °C acima do ponto de orvalho, para reduzir o risco de condensação ou formação de bolhas no revestimento final.
<b>Instruções de aplicação</b>	
<b>Relação de mistura</b>	Componente A : componente B = 79 : 21 (partes em peso).
<b>Mistura</b>	Homogeneizar cada um dos componentes em separado. Adicionar todo o componente B ao componente A. Misturar durante pelo menos 3 minutos com um misturador eléctrico de baixa rotação (500 – 600 rpm) até a mistura se apresentar com aspecto uniforme. Evitar a introdução de ar durante a mistura. Transferir a mistura para um recipiente limpo e misturar novamente durante cerca de 1 minuto. Misturar apenas a quantidade que vai ser utilizada dentro do tempo de vida útil do produto.

<b>Aplicação</b>	<p><b>Aplicação de Icosit® K 101 TW por projecção airtless:</b> Icosit® K 101 TW é um produto de alta viscosidade e com teor de sólidos de 100%, pelo que a aplicação por projecção airtless exigirá equipamento e medidas especiais:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bomba de alta desmultiplicação (relação 60:1) e alto débito; bico 0,45 – 0,66 mm.</li> <li>■ Temperatura do produto não inferior à +20 °C. Abaixo desta temperatura a viscosidade aumenta e pode inviabilizar a projecção. Temperaturas superiores a +25 °C podem encurtar drasticamente o potife e bloquear a projecção.</li> <li>■ Para elevar a temperatura de projecção de forma controlada, projectando um material mais uniforme, pode interpor-se um equipamento aquecedor entre a bomba e a pistola. Neste caso a temperatura de aquecimento deve ser de aprox. +35 °C e bem controlada; a projecção deve ser contínua e o sistema deve ser lavado de imediato com Diluente V-3 se houver qualquer paragem.</li> </ul> <p>Os dados para aplicação airtless são apenas indicativos. Devem ser efectuados ensaios prévios de ajuste caso a caso. Estabelecer procedimentos de projecção conforme as instruções do equipamento e o tipo de base a revestir.</p> <p><b>Aplicação de Icosit® K 101 TW à trincha ou rolo:</b> A aplicação a rolo é o método mais recomendado para aplicação em betão ou reboco, possibilitando uma boa impregnação do produto nos poros e expulsando o ar neles contido.</p>			
<b>Limpeza de ferramentas</b>	<p>Durante os trabalhos de aplicação, e especialmente quando se trate de instalações para água potável, usar sempre ferramentas novas não contaminadas com solventes e lavar unicamente com água e sabão até à conclusão dos trabalhos. No final dos trabalhos, limpar as ferramentas e o equipamento com Diluente V-3.</p>			
<b>Tempo de vida útil da mistura (potife)</b>	Temperatura	+10 °C	+20 °C	+25 °C
	Potife	Aprox. 45 minutos	Aprox. 35 minutos	Aprox. 15 minutos
<b>Intervalo entre camadas</b>	<p>O endurecimento e consequentemente a secagem dependem da temperatura. Geralmente observa-se um intervalo entre camadas de: Min. 24 horas / Máx. 48 horas.</p>			
<b>Importante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ A viscosidade do produto misturado não é estável (diminui ao longo do tempo). Por isso recomenda-se a preparação de todo o equipamento de aplicação antes de se efectuar a mistura dos dois componentes. A aplicação do produto deve ser feita imediatamente após a mistura.</li> </ul>			
<b>Cura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Para contacto com água potável: garantir boa ventilação e uma temperatura mínima de +15 °C durante a aplicação e a cura do produto. Observar um tempo de secagem entre camadas de pelo menos 1 dia. Após a conclusão do revestimento o reservatório deve ser sujeito a ventilação forçada durante 7 dias, 8 horas por dia, à temperatura ambiente, com um débito que permita a renovação do ar 5 vezes por hora. Após este período de secagem lavar e desinfetar o revestimento.</li> <li>■ Antes de exposição a agressividade química: a cura total do revestimento é atingida ao fim de 7 dias, a +20 °C. Este período pode ser alargado ou encurtado a temperaturas inferiores ou superiores, respectivamente.</li> </ul>			
<b>Nota</b>	<p>Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.</p>			

**Risco e segurança**

**Medidas de segurança** Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.

\*O produto está seguro na Cº Seguro XI, Insurance Switzerland (Apólice nºCH00003010L054), 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 analisado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação a 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 solicitada.

**Marcação CE**

A Norma Europeia EN 1504-2 "Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas em betão – Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade – Parte 2: sistemas de protecção superficial para betão" especifica os requisitos dos revestimentos a utilizar para a protecção de estruturas de betão (na construção em geral ou em obras de arte).

Os produtos que se encontram abrangidos por esta especificação necessitam de ter marcação CE, de acordo com o Anexo ZA, Tabela ZA.1a a ZA.1g de acordo com o âmbito e cláusulas relevantes aí indicadas, e cumprir os requisitos do mandato da Directiva de Produtos da Construção (89/106/CEE).



Sika Portugal, SA  
R. de Santarém, 113  
4400-292 V. N. Gaia  
Portugal  
Tel. +351 22 377 06 00  
Fax +351 22 370 20 12  
www.sika.pt




loc@B-K 101 TW 4/4

## C.5. COLA

Construction


**Ficha de Produto**  
 Edição de Julho de 2009  
 Nº de identificação: 6.31  
 Versão nº 7  
 Sikadur®-30



## Sikadur®-30

### Argamassa de epoxi para colagem de reforços estruturais

<b>Descrição do produto</b>	Sikadur®-30 é uma argamassa tixotrópica, adesiva, em dois componentes, baseada numa combinação de resinas epoxi e cargas especiais. Não contém solventes.
<b>Utilizações</b>	Adesivo para colagem de elementos de reforço, especialmente nos trabalhos de reforço estrutural, incluindo: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Colagem de laminados Sika® CarboDur® a betão, alvenaria e madeira (consultar a respectiva Ficha de Produto).</li> <li>■ Colagem de chapas de aço a betão.</li> </ul>
<b>Características / Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fácil mistura e aplicação.</li> <li>■ Não necessita de primário.</li> <li>■ Elevada resistência à deformação sob carga permanente.</li> <li>■ Muito boa aderência a betão, alvenaria, pedra, aço, ferro fundido, alumínio, madeira e laminados Sika® CarboDur®.</li> <li>■ O endurecimento não é afectado pela humidade.</li> <li>■ Elevadas resistências mecânicas.</li> <li>■ Tixotrópico: não escorre quando aplicada na vertical ou em tectos.</li> <li>■ Endurece sem retracção.</li> <li>■ Componentes de cor distinta (para melhor controlo da mistura).</li> <li>■ Elevadas resistências mecânicas iniciais e finais.</li> <li>■ Elevada resistência à abrasão e ao impacto.</li> <li>■ Impermeável à água e ao vapor de água.</li> </ul>
<b>Certificados / Boletins de ensaio</b>	<p>Deutsche Institut für Bautechnik Z-36.12-29, 2006: Autorização de utilização de Sika® CarboDur® na construção geral.</p> <p>IBMB, TU Braunschweig, Boletim de ensaio nº 1871/0054, 1994: Ensaio de aprovação do adesivo epoxi Sikadur®-30.</p> <p>IBMB, TU Braunschweig, Boletim de ensaio nº 1734/6434, 1995: Ensaio da argamassa epoxi de reparatamento Sikadur®-41 em combinação com o adesivo epoxi Sikadur®-30 para a colagem de chapas de aço.</p> <p>Conforme a EN 1504-4.</p>
<b>Dados do produto</b>	
<b>Aspecto / Cor</b>	Componente A: branco. Componente B: preto. Mistura A+B: cinzento claro.
<b>Fornecimento</b>	Conjuntos pré-doseados de 6 kg (A+B).
<b>Armazenagem e conservação</b>	O produto conserva-se durante 24 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada, a temperaturas entre +5 °C e +30 °C. Conservar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.



Sikadur®-30 14

**Dados técnicos**

<b>Base química</b>	Resina epoxi.
<b>Massa volúmica</b>	Mistura A+B (a +23 °C): 1,65 kg/dm <sup>3</sup> ± 0,1 kg/dm <sup>3</sup> .
<b>Escozimento</b>	Não escorre em superfícies verticais até espessuras de 3 – 5 mm (a +35 °C). (segundo a FIP – Fédération Internationale de Précontrainte)
<b>Compressibilidade</b>	4000 mm <sup>3</sup> a +15 °C, para 15 kg. (segundo a FIP – Fédération Internationale de Précontrainte)
<b>Espessura da camada</b>	Máximo 30 mm por camada. É possível a aplicação de várias camadas sobrepostas, desde que a anterior esteja suficientemente endurecida. Quando se utilizam várias embalagens, não misturar a embalagem seguinte até que a anterior seja completamente utilizada.
<b>Retração</b>	0,04%. (Segundo a FIP – Fédération Internationale de Précontrainte)

**Coefficiente de dilatação térmica**  $W = 2,5 \times 10^{-5}$  por °C (para temperaturas entre -20 °C e +40 °C).

**Estabilidade térmica** Temperatura de transição vítrea (TG): (segundo a FIP)

Tempo de cura	Temperatura	T <sub>g</sub>
7 dias	+45 °C	+62 °C

Temperatura de deflexão pelo calor (HDT): (ASTM-D 548)

Tempo de cura	Temperatura	HDT
3 horas	+80 °C	+53 °C
6 horas	+60 °C	+53 °C
7 dias	+35 °C	+53 °C
7 dias	+10 °C	+36 °C

**Temperatura de serviço** -40 °C a +45 °C (quando curado a temperatura superior a +23 °C).

**Propriedades físicas / Mecânicas**

**Resistência à compressão** (EN 196)

Tempo de cura	Temperatura de cura	
	+10 °C	+35 °C
12 horas	-	80 – 90 N/mm <sup>2</sup>
1 dia	50 – 60 N/mm <sup>2</sup>	85 – 95 N/mm <sup>2</sup>
3 dias	65 – 75 N/mm <sup>2</sup>	85 – 95 N/mm <sup>2</sup>
7 dias	70 – 80 N/mm <sup>2</sup>	85 – 95 N/mm <sup>2</sup>

**Resistência ao corte** Ruptura no betão (aprox. 15 N/mm<sup>2</sup>) (FIP 5.15)

Tempo de cura	Temperatura de cura	
	+15 °C	+35 °C
1 dia	3 – 5 N/mm <sup>2</sup>	15 – 18 N/mm <sup>2</sup>
3 dias	13 – 16 N/mm <sup>2</sup>	16 – 19 N/mm <sup>2</sup>
7 dias	14 – 17 N/mm <sup>2</sup>	16 – 19 N/mm <sup>2</sup>

18 N/mm<sup>2</sup> (7 dias, +23 °C)

(segundo DIN 53283)

<b>Resistência à tração</b>		(DIN 53455)	
		<b>Temperatura de cura</b>	
	<b>Tempo de cura</b>	<b>+16 °C</b>	<b>+86 °C</b>
	1 dia	18 – 21 N/mm <sup>2</sup>	23 – 28 N/mm <sup>2</sup>
	3 dias	21 – 24 N/mm <sup>2</sup>	25 – 30 N/mm <sup>2</sup>
	7 dias	24 – 27 N/mm <sup>2</sup>	26 – 31 N/mm <sup>2</sup>
<b>Tensão de aderência</b>	<b>Sobre aço:</b> (DIN EN 24624) > 21 N/mm <sup>2</sup> (valor médio > 30 N/mm <sup>2</sup> ). Sobre a base correctamente preparada (decapada a jacto abrasivo ao grau Sa 2,5).		
	<b>Sobre betão:</b> (segundo a FIP) Ruptura coesiva no betão (> 4 N/mm <sup>2</sup> ).		
<b>Módulo de elasticidade E</b>	À compressão : 9600 N/mm <sup>2</sup> (a +23 °C). À tração : 11200 N/mm <sup>2</sup> (a +23 °C).		(ASTM D695) (Inical, ISO 527)
<b>Informação sobre o sistema</b>			
<b>Estrutura do sistema</b>	Sistema Sika® CarboDur®. Para pormenores de aplicação dos laminados Sika® CarboDur® com Sikadur®-30 consultar a Ficha de Produto dos laminados Sika® CarboDur®.		
<b>Pormenores de aplicação</b>			
<b>Qualidade da base</b>	Conforme ficha de produto dos laminados Sika® CarboDur®.		
<b>Preparação da base</b>	Conforme ficha de produto dos laminados Sika® CarboDur®.		
<b>Condições de aplicação / Limitações</b>			
<b>Temperatura da base</b>	Mínima: +8 °C. Máxima: +35 °C.		
<b>Temperatura ambiente</b>	Mínima: +8 °C. Máxima: +35 °C.		
<b>Temperatura do material</b>	Sikadur®-30 deve ser aplicado a temperaturas entre +8 °C e +35 °C.		
<b>Humidade da base</b>	Máxima 4%. Quando aplicado sobre betão húmido (sem água visível) fazer penetrar bem a cola na base de aplicação.		
<b>Ponto de orvalho</b>	A temperatura da base durante a aplicação deverá estar pelo menos 3 °C acima do ponto de orvalho.		
<b>Instruções de aplicação</b>			
<b>Relação de mistura</b>	Componente A : Componente B = 3 : 1 (partes em peso ou em volume). Quando não se utilizam as embalagens completas é necessário assegurar a correcta dosagem de cada um dos componentes através de pesagem precisa.		
<b>Mistura</b>	Adicionar todo o componente B ao componente A. Misturar durante pelo menos 3 minutos com um misturador eléctrico de baixa rotação (máx. 600 rpm) até o material se apresentar com uma consistência cremosa e cor uniforme. Evitar a introdução de ar durante a mistura. Transferir a mistura para um recipiente limpo e misturar novamente durante cerca de 1 minuto. Misturar apenas a quantidade que vai ser utilizada dentro do tempo de vida útil do produto.		

<b>Aplicação</b>	Consultar a ficha de produto dos laminados Sika® CarboDur®.												
<b>Limpeza de ferramentas</b>	Limpar todas as ferramentas e equipamento com Soluto de Limpeza Colma imediatamente após a utilização. Material curado só pode ser removido mecanicamente.												
<b>Tempo de vida útil da mistura (pot-life)</b>	(Segundo a FIP – Fédération Internationale de Précontrainte) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperatura</th> <th>+8 °C</th> <th>+20 °C</th> <th>+35 °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pot-life</td> <td>Aprox. 120 min.</td> <td>Aprox. 90 min.</td> <td>Aprox. 20 min.</td> </tr> <tr> <td>Tempo aberto</td> <td>Aprox. 150 min.</td> <td>Aprox. 110 min.</td> <td>Aprox. 50 min.</td> </tr> </tbody> </table> <p>O tempo de vida útil da mistura inicia-se no momento da mistura da resina com o endurecedor. É mais curto a temperaturas elevadas e mais longo a temperaturas baixas. Quanto maior a quantidade misturada, menor será o pot-life. Para se conseguir maior tempo de trabalhabilidade a altas temperaturas pode dividir-se a mistura em pequenas porções. Outra medida eficaz é o arrefecimento dos componentes antes da mistura (nunca abaixo de +5 °C).</p>	Temperatura	+8 °C	+20 °C	+35 °C	Pot-life	Aprox. 120 min.	Aprox. 90 min.	Aprox. 20 min.	Tempo aberto	Aprox. 150 min.	Aprox. 110 min.	Aprox. 50 min.
Temperatura	+8 °C	+20 °C	+35 °C										
Pot-life	Aprox. 120 min.	Aprox. 90 min.	Aprox. 20 min.										
Tempo aberto	Aprox. 150 min.	Aprox. 110 min.	Aprox. 50 min.										
<b>Nota</b>	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.												
<b>Risco e segurança</b>													
<b>Medidas de segurança</b>	No estado não curado, ambos os componentes contaminam a água e não devem ser lançados nas canalizações, cursos de água e terrenos. Resíduos, incluindo os do Soluto de Limpeza Colma, devem ser eliminados de acordo com as disposições legais. O produto pode causar irritação de pele; usar fato, luvas e óculos de protecção. Proteger as mãos com creme antes da aplicação. No caso de contacto accidental com os olhos ou mucosas, lavar imediatamente com muita água corrente e consultar o médico mais próximo. Para mais informações, consultar a Ficha de Dados de Segurança do produto e respectivo rótulo.												
	<p>*O produto está seguro na Cª Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice n.ºCH100003018L1054), a título de responsabilidade civil do fabricante.</p> <p>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 aplicação 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 se refere, que será entregue sempre que pedida.</p>												
<b>Marcação CE</b>	A Norma Europeia EN 1504-4 "Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas em betão – Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade – Parte 4: colagem estrutural" fornece especificações para produtos e sistemas utilizados como métodos para os vários princípios apresentados na EN 1504-9.  Os produtos que se encontram abrangidos por esta especificação necessitam de ter a marcação CE, de acordo com o Anexo ZA.1, Tabelas ZA.1a a ZA.1g, de acordo com o âmbito e cláusulas relevantes aí indicadas, e cumprir os requisitos do mandato da Directiva de Produtos da Construção (89/106).												



Sika Portugal, SA  
R. de Santarém, 113 Tel. +351 22 377 09 00  
4400-292 V. N. Gaia Fax +351 22 370 20 12  
Portugal www.sika.pt



Sikadur®-30 4/4



## **ANEXO D – Estudos realizados**

D.1.Determinação da quantidade de superplastificante

D.2.Comparação dos valores entre preparação de 1 e 3 doses

D.3.Repetibilidade entre as quatro ou cinco amassaduras correspondente a cada  
argamassa formulada

D.4.Ficha de resultados para cada argamassa



## D.1.Determinação da quantidade de superplastificante

Família		Consistência Constante - 175±5mm - 1dose	
		SP (g)	Espalhamento (mm)
Não Moído	5F_C	1,70	160
		4,00	220
		3,00	200
		2,00	185
		0,60	178
	10F_C	4,5	250
		0,9	170
		1	175
	15F_C	1,4	200
		1,2	195
		0,9	185
		0,7	180
		1,8	178
Moído 1x	5F_M1_C	3,8	250
		0,8	190
		0,5	176
	10F_M1_C	0,9	175
	15F_M1_C	4,4	250
		1,65	190
1,6		186	
		1,3	180
Moído 2x	5F_M2_C	3,4	250
		3	230
		2	205
		0,9	180
		0,4	175
	10F_M2_C	0,7	175
	15F_M2_C	3,6	240
		2	200
		0,7	160
		1	168
1,1		175	

No Quadro anterior apresentam-se os valores de espalhamento obtido para as diferentes quantidades de superplastificante adicionada. Este estudo teve como finalidade obtenção da quantidade adequada de superplastificante de modo a obter a trabalhabilidade adequada (175±5mm).

Observa-se que, a argamassa conducente à maior quantidade de superplastificante é a 15F\_C, sendo esta quantidade a utilizada para série Teor de SP constante.

## D.2.Comparação dos valores entre preparação de 1 e 3 doses

100C_SP- 1 DOSE						100C_SP- 3 DOSES					
Estado Fresco	Consistência por espalhamento (mm)		199			Estado Fresco	Consistência por espalhamento (mm)		223		
	Massa Volumica (g)		1680				Massa Volumica (g)		1678		
	Teor de ar (%)		4,5				Teor de ar (%)		5,5		
2 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	37,17	v (m/s)	4305	2 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	37,03	v (m/s)	4320
	Ultra- sons - 150 kHz	t (µs)	37,07	v (m/s)	4315		Ultra- sons - 150 kHz	t (µs)	-	v (m/s)	-
	Resistência flexão	Ff (kN)	4,2	Rf (Mpa)	9,8		Resistência flexão	Ff (kN)	3,7	Rf (Mpa)	8,7
	Resistência compressão	Fc (kN)	67,2	Rc (Mpa)	42,0		Resistência compressão	Fc (kN)	68,8	Rc (Mpa)	43,0
7 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	35,27	v (m/s)	4537	7 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	35,33	v (m/s)	4530
	Ultra- sons - 150 kHz	t (µs)	35,20	v (m/s)	4550		Ultra- sons - 150 kHz	t (µs)	-	v (m/s)	-
	Resistência flexão	Ff (kN)	4,3	Rf (Mpa)	10,2		Resistência flexão	Ff (kN)	4,4	Rf (Mpa)	10,4
	Resistência compressão	Fc (kN)	85,8	Rc (Mpa)	53,7		Resistência compressão	Fc (kN)	90,0	Rc (Mpa)	56,3
28 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	34,97	v (m/s)	4577	28 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	35,36	v (m/s)	4510
	Ultra- sons - 150 kHz	t (µs)	35,00	v (m/s)	4573		Ultra- sons - 150 kHz	t (µs)	34,70	v (m/s)	4610
	Resistência flexão	Ff (kN)	4,4	Rf (Mpa)	10,4		Resistência flexão	Ff (kN)	4,4	Rf (Mpa)	10,2
	Resistência compressão	Fc (kN)	101,2	Rc (Mpa)	63,2		Resistência compressão	Fc (kN)	100,2	Rc (Mpa)	62,6
56 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	35,23	v (m/s)	4543	56 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	34,58	v (m/s)	4625
	Ultra- sons - 150 kHz	t (µs)	34,77	v (m/s)	4602		Ultra- sons - 150 kHz	t (µs)	34,63	v (m/s)	4625
	Resistência flexão	Ff (kN)	4,7	Rf (Mpa)	11,0		Resistência flexão	Ff (kN)	4,4	Rf (Mpa)	10,3
	Resistência compressão	Fc (kN)	100,3	Rc (Mpa)	62,7		Resistência compressão	Fc (kN)	106,5	Rc (Mpa)	66,6
90 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	34,47	v (m/s)	4643	90 dias	Ultra- sons - 54 kHz	t (µs)	34,55	v (m/s)	4630
	Ultra- sons - 150 kHz	t (µs)	34,57	v (m/s)	4625		Ultra- sons - 150 kHz	? (µs)	34,35	v (m/s)	4648
	Resistência flexão	Ff (kN)	4,5	Rf (Mpa)	10,6		Resistência flexão	t (µs)	4,3	Rf (Mpa)	10,2
	Resistência compressão	Fc (kN)	105,2	Rc (Mpa)	65,7		Resistência compressão	Fc (kN)	107,0	Rc (Mpa)	66,9

## D.3.Repetibilidade entre as quatro ou cinco amassaduras correspondente a cada argamassa formulada

Família	Formulação	Repetibilidade entre amassaduras							
		2ª Amassadura	3ª Amassadura	Coeficiente Global < 2%	1ª Amassadura	2ª Amassadura	4ª Amassadura	5ª Amassadura	
		Coeficiente de Variação (%)			Consistência por espalhamento (mm) ± 5 mm				
Teor SP constante	Referência	100C_SP	0,1	0,1	0,1	223	223	224	
	Não Moído	5_SP	1,7	1,9	1,7	218	218	219	222
		10_SP	2,2	1,6	1,9	206	208	207	208
	Moído 1x	5_M1_SP	0,8	0,8	1,3	224	225	223	
		10_M1_SP	1,1	1,2	1,6	215	214	216	
		15_M1_SP	1,5	0,9	1,2	205	207	203	
	Moído 2x	5_M2_SP	1,5	0,9	1,1	214	213	215	
		10_M2_SP	1	1,2	1,1	209	208	211	
		15_M2_SP	1,5	1,7	1,8	209	210	212	
	Consistência Constante	Referência	100C	1,7	2,4	1,2	188	188	189
Não Moído		5_C	2,1	0,8	1,9	186	187	187	188
		10_C	2,3	1,3	1,9	189	188	187	186
		15_C	1,5	1,3	1,6	190	189	188	189
		5_M1_C	1,4	1,7	1,5	188	190	189	
Moído 1x		10_M1_C	1,2	2,3	1,8	188	188	188	
		15_M1_C	1	1,6	1,4	188	186	186	
		5_M2_C	1,5	2,1	1,9	190	188	191	
Moído 2x		10_M2_C	1,8	2	1,9	188	188	188	
		15_M2_C	1,1	1,9	1,5	185	186	186	

O quadro anterior apresenta a repetibilidade entre as argamassas realizadas para cada mistura. Por forma de garantir a repetibilidade entre as amassaduras 3 e 4, foram realizados provetes prismáticos para analisar aos 28 dias de idade. Conforme o descrito na NP EN 197-1 [25], para se validar a repetibilidade o coeficiente de variação global deve ser inferior a 2%, caso tal não se verifique a amassadura é rejeitada.

Para as restantes amassaduras realizou-se o ensaio de consistência por espalhamento para garantir esta repetibilidade, nesta perspectiva, o espalhamento entre amassaduras deve estar compreendido entre  $\pm 5\text{mm}$ .

## D.4.Fichas de resultados para cada argamassa

100C										
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem: 3 doses</b>			<b>Ensaio no Estado Fresco</b>			
CEM I 42,5 R	Água	Areia					Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)			
1350 g	675 g	4050 g					188			
1ª Amassadura - Data:				26-03-2012		Hora: 10:03		Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )		
2ª Amassadura - Data:				26-03-2012		Hora: 10:54		1680		
3ª Amassadura - Data:				26-03-2012		Hora: 11:33		Teor de ar (%)		
4ª Amassadura - Data:				20-04-2012		Hora: 10:25		5,6		
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>										
	Ultra- Sons- 54kHz		Ultra- Sons- 150kHz		R. Flexão		R. Compressão		Aderência	Capilaridade
2 dias	t (µs)	36,9	t (µs)	-	Ff (kN)	2,77	Fc (kN)	53		
	v (m/s)	4337	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	6,5	Rc (Mpa)	33,1		
7 dias	t (µs)	35,87	t (µs)	-	Ff (kN)	3,73	Fc (kN)	75,5		
	v (m/s)	4460	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,8	Rc (Mpa)	47,2		
28 dias	t (µs)	35,25	t (µs)	34,76	Ff (kN)	4,2	Fc (kN)	95,42	Fr (N)	858,33
	v (m/s)	4460	v (m/s)	4610	Rf (Mpa)	9,8	Rc (Mpa)	59,6	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,34
									c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	
									0,19	
56 dias	t (µs)	34,68	t (µs)	34,76	Ff (kN)	4,62	Fc (kN)	102		
	v (m/s)	4540	v (m/s)	4610	Rf (Mpa)	10,8	Rc (Mpa)	63,8		
90 dias	t (µs)	34,85	t (µs)	34,65	Ff (kN)	3,93	Fc (kN)	95,17		
	v (m/s)	4592	v (m/s)	4618	Rf (Mpa)	9,2	Rc (Mpa)	59,5		

100C_SP										
Composição:					Ensaio no Estado Fresco					
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante					Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)					
1350 g   75 g + 225g   4050 g   5,4 g					223					
1ª Amassadura - Data:    26-03-2012    Hora: 14:09					Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )					
2ª Amassadura - Data:    26-03-2012    Hora: 15:00					1678					
3ª Amassadura - Data:    26-03-2012    Hora: 15:36					Teor de ar (%)					
4ª Amassadura - Data:    20-04-2012    Hora: 11:05					5,5					
Ensaio no Estado Endurecido										
	Ultra- Sons- 54kHz		Ultra- Sons- 150kHz		R. Flexão		R. Compressão		Aderência    Capilaridade	
2 dias	t (µs)	37,3	t (µs)	-	Ff (kN)	3,7	Fc (kN)	68,83		
	v (m/s)	4320	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,7	Rc (Mpa)	43,0		
7 dias	t (µs)	35,33	t (µs)	-	Ff (kN)	4,43	Fc (kN)	90		
	v (m/s)	4530	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	10,4	Rc (Mpa)	56,3		
28 dias	t (µs)	35,6	t (µs)	34,7	Ff (kN)	4,37	Fc (kN)	100,22	Fr (N)	1580
	v (m/s)	4510	v (m/s)	4610	Rf (Mpa)	10,2	Rc (Mpa)	62,6	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,63
									c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	
									0,17	
56 dias	t (µs)	34,58	t (µs)	34,63	Ff (kN)	4,4	Fc (kN)	106,5		
	v (m/s)	4625	v (m/s)	4625	Rf (Mpa)	10,3	Rc (Mpa)	66,6		
90 dias	t (µs)	34,55	t (µs)	34,35	Ff (kN)	4,33	Fc (kN)	107		
	v (m/s)	4630	v (m/s)	4648	Rf (Mpa)	10,2	Rc (Mpa)	66,9		

100C_SP - 1DOSE								
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem:</b> 1 dose		<b>Ensaio no Estado Fresco</b>		
CEM I 42,5 R	Água	Areia	Superplastificante	Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)				
450 g	225g	1350 g	1,8 g	199				
1ª Amassadura - Data:				Hora:		Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )		
2ª Amassadura - Data:				Hora:		1680		
3ª Amassadura - Data:				Hora:		Teor de ar (%)		
4ª Amassadura - Data:				Hora:		4,5		
Ensaio no Estado Endurecido								
	Ultra- Sons- 54kHz		Ultra- Sons- 150kHz		R. Flexão		R. Compressão	
2 dias	t (µs)	37,17	t (µs)	37,07	Ff (kN)	4,18	Fc (kN)	67,2
	v (m/s)	4305	v (m/s)	4315	Rf (Mpa)	9,8	Rc (Mpa)	42,0
7 dias	t (µs)	35,27	t (µs)	35,2	Ff (kN)	4,33	Fc (kN)	85,8
	v (m/s)	4536	v (m/s)	4550	Rf (Mpa)	10,2	Rc (Mpa)	53,6
28 dias	t (µs)	34,97	t (µs)	35	Ff (kN)	4,43	Fc (kN)	101,17
	v (m/s)	4576	v (m/s)	4573	Rf (Mpa)	10,4	Rc (Mpa)	63,2
56 dias	t (µs)	35,23	t (µs)	34,77	Ff (kN)	4,68	Fc (kN)	100,33
	v (m/s)	4543	v (m/s)	4573	Rf (Mpa)	10,4	Rc (Mpa)	62,7
90 dias	t (µs)	34,47	t (µs)	34,57	Ff (kN)	4,5	Fc (kN)	105,16
	v (m/s)	4643	v (m/s)	4625	Rf (Mpa)	10,6	Rc (Mpa)	65,7

5F_SP										
Composição:				Dosagem: 3 doses			Ensaio no Estado Fresco			
							Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)			
							218			
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante							Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )			
1350 g    675 g    4050 g    5,4 g							1639			
1ª Amassadura - Data:				03-04-2012		Hora: 10:46		Teor de ar (%)		
2ª Amassadura - Data:				04-03-2012		Hora: 11:35		5,6		
3ª Amassadura - Data:				03-04-2012		Hora: 12:05				
4ª Amassadura - Data:				26-04.2012		Hora: 10:00				
5ª Amassadura - Data:				17-05-2012		Hora: 12:55				
Ensaio no Estado Endurecido										
	Ultra- Sons- 54kHz		Ultra- Sons- 150kHz		R. Flexão		R. Compressão		Aderência    Capilaridade	
2 dias	t (µs)	37,9	t (µs)	-	Ff (kN)	3,53	Fc (kN)	63		
	v (m/s)	4217	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,3	Rc (Mpa)	39,4		
7 dias	t (µs)	36,2	t (µs)	-	Ff (kN)	3,9	Fc (kN)	89,0		
	v (m/s)	4420	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	9,1	Rc (Mpa)	55,63		
28 dias	t (µs)	35,5	t (µs)	35,5	Ff (kN)	4,26	Fc (kN)	104,17	Fr (N)	750
	v (m/s)	4512	v (m/s)	4498	Rf (Mpa)	10,0	Rc (Mpa)	65,1	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,3
56 dias	t (µs)	34,7	t (µs)	34,77	Ff (kN)	4,35	Fc (kN)	109	c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	
	v (m/s)	4615	v (m/s)	4603	Rf (Mpa)	10,2	Rc (Mpa)	68,1	0,11	
90 dias	t (µs)	34,63	t (µs)	34,75	Ff (kN)	4,42	Fc (kN)	110		
	v (m/s)	4620	v (m/s)	4608	Rf (Mpa)	10,4	Rc (Mpa)	68,8		

10F_SP										
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem: 3 doses</b>			<b>Ensaio no Estado Fresco</b>			
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante							Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)			
1350 g    675 g    4050 g    5,4 g							207			
1ª Amassadura - Data:    09-04-2012    Hora: 10:04							Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )			
2ª Amassadura - Data:    09-04-2012    Hora: 10:50							1610			
3ª Amassadura - Data:    09-04-2012    Hora: 10:20							Teor de ar (%)			
4ª Amassadura - Data:    19-05-2012    Hora: 11:20							7,2			
5ª Amassadura - Data:    17-05-2012    Hora: 16:00										
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>										
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência    Capilaridade</b>	
2 dias	? (µs)	39,1	? (µs)	-	Ff (kN)	3,3	Fc (kN)	57		
	v (m/s)	4093	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	7,7	Rc (Mpa)	35,6		
7 dias	? (µs)	36,2	? (µs)	-	Ff (kN)	3,73	Fc (kN)	88,7		
	v (m/s)	4418	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,8	Rc (Mpa)	55,42		
28 dias	? (µs)	36	? (µs)	35,4	Ff (kN)	4,17	Fc (kN)	103,5	Fr (N)	688,71
	v (m/s)	4444	v (m/s)	4439	Rf (Mpa)	9,8	Rc (Mpa)	64,7	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,28
									c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	
									0,18	
56 dias	? (µs)	34,6	? (µs)	35,23	Ff (kN)	4,15	Fc (kN)	110,83		
	v (m/s)	4620	v (m/s)	4540	Rf (Mpa)	9,7	Rc (Mpa)	69,3		
90 dias	? (µs)	35,2	? (µs)	34,85	Ff (kN)	4,17	Fc (kN)	110,67		
	v (m/s)	4547	v (m/s)	4593	Rf (Mpa)	9,8	Rc (Mpa)	69,2		

15F_SP ou 15F_C										
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem: 3 doses</b>			<b>Ensaio no Estado Fresco</b>			
							Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)			
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante										
1350 g    675 g    4050 g    5,4 g							Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )			
							1629			
1ª Amassadura - Data:    09-04-2012    Hora: 13:59							Teor de ar (%)			
2ª Amassadura - Data:    09-04-2012    Hora: 13:37										
3ª Amassadura - Data:    09-04-2012    Hora: 12:04							5,4			
4ª Amassadura - Data:    26-04-2012    Hora: 10:55										
5ª Amassadura - Data:    17-05-2012    Hora: 13:30										
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>										
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência    Capilaridade</b>	
2 dias	? (µs)	39,9	? (µs)	-	Ff (kN)	3	Fc (kN)	50,67		
	v (m/s)	4007	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	7,0	Rc (Mpa)	31,7		
7 dias	? (µs)	37,3	? (µs)	-	Ff (kN)	3,62	Fc (kN)	82,3		
	v (m/s)	4287	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,5	Rc (Mpa)	51,46		
28 dias	? (µs)	36,7	? (µs)	36,3	Ff (kN)	4	Fc (kN)	100,17	Fr (N)	464,29
	v (m/s)	4363	v (m/s)	4412	Rf (Mpa)	9,4	Rc (Mpa)	62,6	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,19
									c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	
									0,17	
56 dias	? (µs)	36,05	? (µs)	35,82	Ff (kN)	3,87	Fc (kN)	103,83		
	v (m/s)	4437	v (m/s)	4470	Rf (Mpa)	9,1	Rc (Mpa)	64,9		
90 dias	? (µs)	35,8	? (µs)	35,42	Ff (kN)	4,03	Fc (kN)	104,5		
	v (m/s)	4465	v (m/s)	4520	Rf (Mpa)	9,5	Rc (Mpa)	65,3		

5F_M1_SP											
Composição:				Dosagem: 3 doses			Ensaio no Estado Fresco				
CEM I 42,5 R	Água	Areia	Superplastificante				Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)				
1350 g	675 g	4050 g	5,4 g				224				
1ª Amassadura - Data: 02-04-2012				Hora: 09:15			Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )				
2ª Amassadura - Data: 02-04-2012				Hora: 11:05			1654				
3ª Amassadura - Data: 02-04-2012				Hora: 11:53			Teor de ar (%)				
4ª Amassadura - Data: 17-05-2012				Hora: 10:10			6,4				
Ensaio no Estado Endurecido											
	Ultra- Sons- 54kHz		Ultra- Sons- 150kHz		R. Flexão		R. Compressão		Aderência	Capilaridade	
2 dias	t (µs)	37,8	t (µs)	-	Ff (kN)	3,4	Fc (kN)	62,83			
	v (m/s)	4233	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,0	Rc (Mpa)	39,3			
7 dias	t (µs)	35,9	t (µs)	-	Ff (kN)	4,33	Fc (kN)	90,17			
	v (m/s)	4460	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	10,2	Rc (Mpa)	56,4			
28 dias	t (µs)	34,8	t (µs)	35,2	Ff (kN)	4,57	Fc (kN)	105,67	Fr (N)	1038,6	c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )
	v (m/s)	4494	v (m/s)	4538	Rf (Mpa)	10,7	Rc (Mpa)	66,0	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,42	0,17
56 dias	t (µs)	34,7	t (µs)	35	Ff (kN)	4,13	Fc (kN)	110,66			
	v (m/s)	4608	v (m/s)	4573	Rf (Mpa)	9,7	Rc (Mpa)	69,2			
90 dias	t (µs)	34,7	t (µs)	34,77	Ff (kN)	4,15	Fc (kN)	113			
	v (m/s)	4611	v (m/s)	4063	Rf (Mpa)	9,7	Rc (Mpa)	70,6			

10F_M1_SP										
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem: 3 doses</b>		<b>Ensaio no Estado Fresco</b>				
CEM I 42,5 R	Água	Areia	Superplastificante	Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)						
1350 g	675 g	4050 g	5,4 g	215						
1ª Amassadura - Data: 02-04-2012 Hora: 14:50				Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )						
2ª Amassadura - Data: 02-04-2012 Hora: 15:25				1647						
3ª Amassadura - Data: 02-04-2012 Hora: 15:57				Teor de ar (%)						
4ª Amassadura - Data: 17-05-2012 Hora: 10:30				6,2						
Ensaio no Estado Endurecido										
	Ultra- Sons- 54kHz		Ultra- Sons- 150kHz		R. Flexão		R. Compressão		Aderência Capilaridade	
2 dias	t (µs)	38,5	t (µs)	-	Ff (kN)	3,47	Fc (kN)	60,33		
	v (m/s)	4153	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,1	Rc (Mpa)	37,7		
7 dias	t (µs)	36,3	t (µs)	-	Ff (kN)	3,93	Fc (kN)	87,83		
	v (m/s)	4403	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	9,2	Rc (Mpa)	54,9		
28 dias	t (µs)	35,5	t (µs)	35,4	Ff (kN)	4,23	Fc (kN)	107,25	Fr (N)	766,29
	v (m/s)	4503	v (m/s)	4521	Rf (Mpa)	9,9	Rc (Mpa)	67,0	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,35
56 dias	t (µs)	35,6	t (µs)	35,3	Ff (kN)	4,38	Fc (kN)	114		
	v (m/s)	4528	v (m/s)	4537	Rf (Mpa)	10,3	Rc (Mpa)	71,3		
90 dias	t (µs)	34,82	t (µs)	35,1	Ff (kN)	4,16	Fc (kN)	113,7		
	v (m/s)	4597	v (m/s)	4558	Rf (Mpa)	9,8	Rc (Mpa)	71,0		

15F_M1_SP											
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem: 3 doses</b>		<b>Ensaio no Estado Fresco</b>					
CEM I 42,5 R	Água	Areia	Superplastificante	Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)							
1350 g	675 g	4050 g	5,4 g	205							
1ª Amassadura - Data:				03-04-2012	Hora: 10:10		Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )				
2ª Amassadura - Data:				03-04-2012	Hora: 16:34		1642				
3ª Amassadura - Data:				03-04-2012	Hora: 12:33		Teor de ar (%)				
4ª Amassadura - Data:				17-05-2012	Hora: 10:50		6,0				
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>											
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência</b>	<b>Capilaridade</b>	
2 dias	? (µs)	39,1	? (µs)	-	Ff (kN)	3,03	Fc (kN)	55,5			
	v (m/s)	4093	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	7,1	Rc (Mpa)	34,7			
7 dias	? (µs)	36,7	? (µs)	-	Ff (kN)	3,87	Fc (kN)	85,0			
	v (m/s)	4360	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	9,1	Rc (Mpa)	53,13			
28 dias	? (µs)	36,3	? (µs)	36	Ff (kN)	4,16	Fc (kN)	105,33	Fr (N)	966,67	c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )
	v (m/s)	4413	v (m/s)	4442	Rf (Mpa)	9,8	Rc (Mpa)	65,8	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,39	0,14
56 dias	? (µs)	35,7	? (µs)	35,6	Ff (kN)	4,25	Fc (kN)	108,16			
	v (m/s)	4472	v (m/s)	4495	Rf (Mpa)	10,0	Rc (Mpa)	67,6			
90 dias	? (µs)	35,5	? (µs)	35,67	Ff (kN)	4,15	Fc (kN)	106,67			
	v (m/s)	4503	v (m/s)	4485	Rf (Mpa)	9,7	Rc (Mpa)	66,7			

5F_M2_SP											
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem: 3 doses</b>		<b>Ensaio no Estado Fresco</b>					
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante						Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)					
1350 g    75 g + 225l    4050 g    5,4 g						214					
1ª Amassadura - Data:    27-03-2012    Hora: 10:08						Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )					
2ª Amassadura - Data:    27-03-2012    Hora: 10:54						1658					
3ª Amassadura - Data:    27-03-2012    Hora: 15:28						Teor de ar (%)					
4ª Amassadura - Data:    15-06-2012    Hora: 12:00						4,7					
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>											
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência    Capilaridade</b>		
2 dias	t (µs)	37,82	t (µs)	-	Ff (kN)	3,63	Fc (kN)	63,5			
	v (m/s)	4228	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,5	Rc (Mpa)	39,7			
7 dias	t (µs)	35,67	t (µs)	-	Ff (kN)	4,07	Fc (kN)	89,2			
	v (m/s)	4483	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	9,5	Rc (Mpa)	55,7			
28 dias	t (µs)	35,17	t (µs)	34,9	Ff (kN)	4,25	Fc (kN)	109,8	Fr (N)	1104,5	c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )
	v (m/s)	4550	v (m/s)	4641	Rf (Mpa)	10,0	Rc (Mpa)	68,2	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,44	0,15
56 dias	t (µs)	34,47	t (µs)	34,93	Ff (kN)	4,57	Fc (kN)	113,3			
	v (m/s)	4643	v (m/s)	4583	Rf (Mpa)	10,7	Rc (Mpa)	70,8			
90 dias	t (µs)	34,73	t (µs)	34,52	Ff (kN)	4,48	Fc (kN)	114,2			
	v (m/s)	4607	v (m/s)	4635	Rf (Mpa)	10,5	Rc (Mpa)	71,4			

10F_M2_SP										
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem: 3 doses</b>		<b>Ensaio no Estado Fresco</b>				
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante						Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)				
1350 g    75 g + 225g    4050 g    5,4 g						209				
1ª Amassadura - Data:    27-03-2012    Hora: 16:10						Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )				
2ª Amassadura - Data:    27-03-2012    Hora: 16:50						1655				
3ª Amassadura - Data:    27-03-2012    Hora: 17:22						Teor de ar (%)				
4ª Amassadura - Data:    15-06-2012    Hora: 12:23						5				
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>										
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência    Capilaridade</b>	
2 dias	t (µs)	38,1	t (µs)	-	Ff (kN)	3,43	Fc (kN)	61,33		
	v (m/s)	4202	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,0	Rc (Mpa)	38,3		
7 dias	t (µs)	36,1	t (µs)	-	Ff (kN)	4	Fc (kN)	89,83		
	v (m/s)	4440	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	9,4	Rc (Mpa)	54,9		
28 dias	t (µs)	35,8	t (µs)	35,2	Ff (kN)	4,41	Fc (kN)	114,12	Fr (N)	891
	v (m/s)	4465	v (m/s)	4557,1	Rf (Mpa)	10,3	Rc (Mpa)	71,3	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,36
									c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	
56 dias	t (µs)	35,2	t (µs)	35	Ff (kN)	4,43	Fc (kN)	113,17		
	v (m/s)	4550	v (m/s)	4575	Rf (Mpa)	10,4	Rc (Mpa)	70,7		
90 dias	t (µs)	34,85	t (µs)	35,25	Ff (kN)	4,43	Fc (kN)	115,5		
	v (m/s)	4593	v (m/s)	4547	Rf (Mpa)	10,4	Rc (Mpa)	72,2		



5F_C										
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem:</b> 3 doses			<b>Ensaio no Estado Fresco</b>			
							Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)			
							187			
							Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )			
							1598			
							Teor de ar (%)			
							7,4			
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante										
1350 g    675 g    4050 g    1,8 g										
1ª Amassadura - Data:				18-04-2012		Hora: 12:05				
2ª Amassadura - Data:				18-04-2012		Hora: 11:35				
3ª Amassadura - Data:				18-04-2012		Hora: 10:59				
4ª Amassadura - Data:				15-05-2012		Hora: 15:23				
5ª Amassadura - Data:				17-05-2012		Hora: 14:00				
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>										
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência    Capilaridade</b>	
2 dias	t (µs)	39,6	t (µs)	39,3	Ff (kN)	2,87	Fc (kN)	47,33		
	v (m/s)	4037	v (m/s)	4073	Rf (Mpa)	6,7	Rc (Mpa)	29,6		
7 dias	t (µs)	37,9	t (µs)	37	Ff (kN)	3,67	Fc (kN)	72,0		
	v (m/s)	4222	v (m/s)	4325	Rf (Mpa)	8,6	Rc (Mpa)	45		
28 dias	t (µs)	35,6	t (µs)	35,9	Ff (kN)	3,975	Fc (kN)	91,83	Fr (N)	1156
	v (m/s)	4499	v (m/s)	4460	Rf (Mpa)	9,3	Rc (Mpa)	57,4	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,46
56 dias	t (µs)	35,38	t (µs)	35,68	Ff (kN)	4,15	Fc (kN)	97,17	c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	
	v (m/s)	4523	v (m/s)	4485	Rf (Mpa)	9,7	Rc (Mpa)	60,7	0,14	
90 dias	t (µs)	35,3	t (µs)	35,48	Ff (kN)	3,93	Fc (kN)	98,17		
	v (m/s)	4537	v (m/s)	4510	Rf (Mpa)	9,2	Rc (Mpa)	61,4		

10F_C											
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem:</b> 3 doses				<b>Ensaio no Estado Fresco</b>			
								Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)			
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante				188				Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )			
1350 g    675 g    4050 g    1,2 g				1607				Teor de ar (%)			
1ª Amassadura - Data:				18-04-2012		Hora: 17:10		6,4			
2ª Amassadura - Data:				18-04-2012		Hora: 16:37					
3ª Amassadura - Data:				18-04-2012		Hora: 17:42					
4ª Amassadura - Data:				03-05-2012		Hora: 11:36					
5ª Amassadura - Data:				17-05-2012		Hora: 15:40					
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>											
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência      Capilaridade</b>		
2 dias	t (µs)	39,7	t (µs)	39,7	Ff (kN)	2,87	Fc (kN)	48,33			
	v (m/s)	4027	v (m/s)	4027	Rf (Mpa)	6,7	Rc (Mpa)	30,2			
7 dias	t (µs)	37,2	t (µs)	37,5	Ff (kN)	3,9	Fc (kN)	79,2			
	v (m/s)	4305	v (m/s)	4275	Rf (Mpa)	9,1	Rc (Mpa)	49,48			
28 dias	t (µs)	35,8	t (µs)	35,9	Ff (kN)	3,82	Fc (kN)	93,17	Fr (N)	909,75	c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )
	v (m/s)	4463	v (m/s)	4456	Rf (Mpa)	9,0	Rc (Mpa)	58,5	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,36	0,16
56 dias	t (µs)	35,18	t (µs)	36,13	Ff (kN)	3,92	Fc (kN)	99,83			
	v (m/s)	4552	v (m/s)	4428	Rf (Mpa)	9,2	Rc (Mpa)	62,4			
90 dias	t (µs)	35,52	t (µs)	35,55	Ff (kN)	3,87	Fc (kN)	101,5			
	v (m/s)	4503	v (m/s)	4498	Rf (Mpa)	9,1	Rc (Mpa)	63,4			

5F_M1_C											
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem: 3 doses</b>		<b>Ensaio no Estado Fresco</b>					
						Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)					
						189					
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante						Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )					
1350 g    675 g    4050 g    1,5 g						1634					
1ª Amassadura - Data:				16-04-2012		Hora: 09:05		Teor de ar (%)			
2ª Amassadura - Data:				16-04-2012		Hora: 08:04		5,0			
3ª Amassadura - Data:				16-04-2012		Hora: 08:35					
4ª Amassadura - Data:				15-06-2012		Hora: 15:00					
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>											
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência    Capilaridade</b>		
2 dias	t (µs)	38,8	t (µs)	38,4	Ff (kN)	2,92	Fc (kN)	50,33			
	v (m/s)	4323	v (m/s)	4170	Rf (Mpa)	6,8	Rc (Mpa)	31,5			
7 dias	t (µs)	36,6	t (µs)	36,3	Ff (kN)	3,6	Fc (kN)	75,2			
	v (m/s)	4372	v (m/s)	4415	Rf (Mpa)	8,4	Rc (Mpa)	46,98			
28 dias	t (µs)	35,7	t (µs)	35,7	Ff (kN)	4,08	Fc (kN)	95,75	Fr (N)	1104,3	c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )
	v (m/s)	4488	v (m/s)	4478	Rf (Mpa)	9,6	Rc (Mpa)	60,4	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,44	0,17
56 dias	t (µs)	34,63	t (µs)	35,23	Ff (kN)	3,9	Fc (kN)	100,83			
	v (m/s)	4630	v (m/s)	4542	Rf (Mpa)	9,1	Rc (Mpa)	63,0			
90 dias	t (µs)	34,9	t (µs)	35,38	Ff (kN)	3,97	Fc (kN)	100,17			
	v (m/s)	4578	v (m/s)	4523	Rf (Mpa)	9,3	Rc (Mpa)	62,6			

## 10F\_M1\_C

Composição:				Dosagem: 3 doses		Ensaio no Estado Fresco			
						Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)			
CEM I 42,5 R	Água	Areia	Superplastificante	Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )					
1350 g	675 g	4050 g	2,7 g	1631					
1ª Amassadura - Data:				16-04-2012	Hora: 14:55		Teor de ar (%)		
2ª Amassadura - Data:				16-04-2012	Hora: 15:35		4,8		
3ª Amassadura - Data:				16-04-2012	Hora: 16:07				
4ª Amassadura - Data:				03-05-2012	Hora: 10:20				

## Ensaio no Estado Endurecido

	Ultra- Sons- 54kHz		Ultra- Sons- 150kHz		R. Flexão		R. Compressão		Aderência		Capilaridade
	2 dias	t (µs)	39,2	t (µs)	39,1	Ff (kN)	2,9	Fc (kN)	51,83		
	v (m/s)	4088	v (m/s)	4090	Rf (Mpa)	6,8	Rc (Mpa)	32,4			
7 dias	t (µs)	36,7	t (µs)	36,7	Ff (kN)	3,87	Fc (kN)	81,3			
	v (m/s)	4360	v (m/s)	4357	Rf (Mpa)	9,1	Rc (Mpa)	50,83			
28 dias	t (µs)	35,8	t (µs)	36	Ff (kN)	4,03	Fc (kN)	100,92	Fr (N)	748	c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )
	v (m/s)	4468	v (m/s)	4450	Rf (Mpa)	9,5	Rc (Mpa)	63,8	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,3	0,15
56 dias	t (µs)	35,48	t (µs)	35,38	Ff (kN)	3,98	Fc (kN)	110,5			
	v (m/s)	4510	v (m/s)	4520	Rf (Mpa)	9,3	Rc (Mpa)	69,1			
90 dias	t (µs)	35,23	t (µs)	35,35	Ff (kN)	4,21	Fc (kN)	112,17			
	v (m/s)	4540	v (m/s)	4518	Rf (Mpa)	9,9	Rc (Mpa)	70,1			

15F_M1_C											
<b>Composição:</b>					<b>Dosagem: 3 doses</b>					<b>Ensaio no Estado Fresco</b>	
										Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)	
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante											
1350 g    675 g    4050 g    3,4 g					Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )						
					1638						
1ª Amassadura - Data:    17-04-2012    Hora: 09:47					Teor de ar (%)						
2ª Amassadura - Data:    16-04-2012    Hora: 16:42					5,4						
3ª Amassadura - Data:    16-04-2012    Hora: 17:16											
4ª Amassadura - Data:    03-05-2012    Hora: 10:50											
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>											
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência    Capilaridade</b>		
2 dias	t (µs)	39,9	t (µs)	39,9	Ff (kN)	2,9	Fc (kN)	50,67			
	v (m/s)	4008	v (m/s)	4015	Rf (Mpa)	6,8	Rc (Mpa)	31,7			
7 dias	t (µs)	38,4	t (µs)	36,9	Ff (kN)	3,5	Fc (kN)	83,3			
	v (m/s)	4170	v (m/s)	4345	Rf (Mpa)	8,2	Rc (Mpa)	52,08			
28 dias	t (µs)	36,4	t (µs)	36,4	Ff (kN)	4,15	Fc (kN)	101,33	Fr (N)	642,5	
	v (m/s)	4398	v (m/s)	4403	Rf (Mpa)	9,7	Rc (Mpa)	63,5	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,26	
									c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )		
56 dias	t (µs)	35,4	t (µs)	35,82	Ff (kN)	4,12	Fc (kN)	110,4			
	v (m/s)	4522	v (m/s)	4465	Rf (Mpa)	9,7	Rc (Mpa)	69,0			
90 dias	t (µs)	35,47	t (µs)	35,72	Ff (kN)	3,92	Fc (kN)	109,83			
	v (m/s)	4512	v (m/s)	4477	Rf (Mpa)	9,2	Rc (Mpa)	68,7			

5F_M2_C										
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem: 3 doses</b>		<b>Ensaio no Estado Fresco</b>				
CEM I 42,5 R	Água	Areia	Superplastificante	Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)						
1350 g	675 g	4050 g	1,2 g	190						
1ª Amassadura - Data: 10-04-2012 Hora: 11:05				Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )						
2ª Amassadura - Data: 09-04-2012 Hora: 15:07				1632						
3ª Amassadura - Data: 10-04-2012 Hora: 11:40				Teor de ar (%)						
4ª Amassadura - Data: 17-05-2012 Hora: 11:40				5,4						
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>										
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência Capilaridade</b>	
2 dias	t (µs)	38,2	t (µs)	-	Ff (kN)	3,33	Fc (kN)	52,33		
	v (m/s)	4190	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	7,8	Rc (Mpa)	32,7		
7 dias	t (µs)	36,1	t (µs)	-	Ff (kN)	3,8	Fc (kN)	78,0		
	v (m/s)	4432	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	8,9	Rc (Mpa)	48,75		
28 dias	t (µs)	35,7	t (µs)	35,9	Ff (kN)	4,12	Fc (kN)	96,75	Fr (N)	1331,3
	v (m/s)	4484	v (m/s)	4456	Rf (Mpa)	9,7	Rc (Mpa)	61,2	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,5
									c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	
56 dias	t (µs)	35,1	t (µs)	35,38	Ff (kN)	3,85	Fc (kN)	99,5		
	v (m/s)	4563	v (m/s)	4520	Rf (Mpa)	9,0	Rc (Mpa)	62,2		
90 dias	t (µs)	34,85	t (µs)	34,95	Ff (kN)	3,97	Fc (kN)	100,5		
	v (m/s)	4593	v (m/s)	4568	Rf (Mpa)	9,3	Rc (Mpa)	62,8		

10F_M2_C											
<b>Composição:</b>				<b>Dosagem:</b> 3 doses		<b>Ensaio no Estado Fresco</b>					
CEM I 42,5 R	Água	Areia	Superplastificante	Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)							
1350 g	675 g	4050 g	2,1 g	188							
1ª Amassadura - Data: 10-04-2012 Hora: 16:04				Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )							
2ª Amassadura - Data: 11-04-2012 Hora: 11:24				1633							
3ª Amassadura - Data: 11-04-2012 Hora: 11:56				Teor de ar (%)							
4ª Amassadura - Data: 15-06-2012 Hora: 14:45				5,7							
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>											
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência</b>	<b>Capilaridade</b>	
2 dias	t (µs)	39,3	t (µs)	-	Ff (kN)	2,97	Fc (kN)	51,83			
	v (m/s)	4067	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	7,0	Rc (Mpa)	32,4			
7 dias	t (µs)	37	t (µs)	36,6	Ff (kN)	3,83	Fc (kN)	81,7			
	v (m/s)	4320	v (m/s)	4387	Rf (Mpa)	9,0	Rc (Mpa)	51,04			
28 dias	t (µs)	36,3	t (µs)	36	Ff (kN)	4,13	Fc (kN)	100,58	Fr (N)	478,75	c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )
	v (m/s)	4408	v (m/s)	4444	Rf (Mpa)	9,8	Rc (Mpa)	62,8	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,19	0,16
56 dias	t (µs)	34,8	t (µs)	35,45	Ff (kN)	4,02	Fc (kN)	107,5			
	v (m/s)	4593	v (m/s)	4515	Rf (Mpa)	9,4	Rc (Mpa)	67,2			
90 dias	t (µs)	34,85	t (µs)	35,22	Ff (kN)	4,07	Fc (kN)	105,33			
	v (m/s)	4595	v (m/s)	4547	Rf (Mpa)	9,5	Rc (Mpa)	65,8			

15F_M2_C										
<b>Composição:</b>					<b>Ensaio no Estado Fresco</b>					
<b>Dosagem: 3 doses</b>					Mesa de espalhamento - diâmetro médio (mm)					
CEM I 42,5 R    Água    Areia    Superplastificante					186					
1350 g    675 g    4050 g    3,3 g					Massa volumica (Kg/m <sup>3</sup> )					
					1627					
1ª Amassadura - Data:    11-04-2012    Hora: 16:40					Teor de ar (%)					
2ª Amassadura - Data:    11-04-2012    Hora: 12:33					5,7					
3ª Amassadura - Data:    11-04-2012    Hora: 15:03										
4ª Amassadura - Data:    03-04-2012    Hora: 09:30										
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>										
	<b>Ultra- Sons- 54kHz</b>		<b>Ultra- Sons- 150kHz</b>		<b>R. Flexão</b>		<b>R. Compressão</b>		<b>Aderência    Capilaridade</b>	
2 dias	t (µs)	40,2	t (µs)	-	Ff (kN)	3	Fc (kN)	50,83		
	v (m/s)	3983	v (m/s)	-	Rf (Mpa)	7,0	Rc (Mpa)	31,8		
7 dias	t (µs)	37,2	t (µs)	37,1	Ff (kN)	3,63	Fc (kN)	82,7		
	v (m/s)	4303	v (m/s)	4322	Rf (Mpa)	8,5	Rc (Mpa)	51,67		
28 dias	t (µs)	36,3	t (µs)	36,4	Ff (kN)	4,1	Fc (kN)	102,83	Fr (N)	695
	v (m/s)	4403	v (m/s)	4398	Rf (Mpa)	9,6	Rc (Mpa)	64,9	Fa (N/mm <sup>2</sup> )	0,28
									c (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	
56 dias	t (µs)	36,27	t (µs)	35,8	Ff (kN)	3,75	Fc (kN)	109,5		
	v (m/s)	4413	v (m/s)	4470	Rf (Mpa)	8,8	Rc (Mpa)	68,4		
90 dias	t (µs)	36,05	t (µs)	35,65	Ff (kN)	3,98	Fc (kN)	111		
	v (m/s)	4448	v (m/s)	3753	Rf (Mpa)	9,3	Rc (Mpa)	69,4		

## **ANEXO E – DADOS DO OSCILOSCÓPIO E CORRELAÇÕES**

E.1. Ondas Longitudinais obtidas pelo osciloscópio no ensaio de ultrassons

E.2. Relação entre a resistência à flexão e compressão das diferentes argamassas

estudadas (coeficiente de ductilidade)

E.3. Relação entre a velocidade de ultrassons e a resistência à compressão das argamassas

estudadas

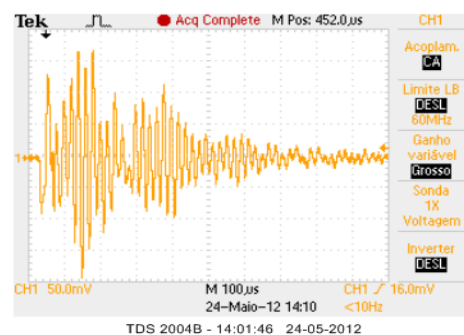
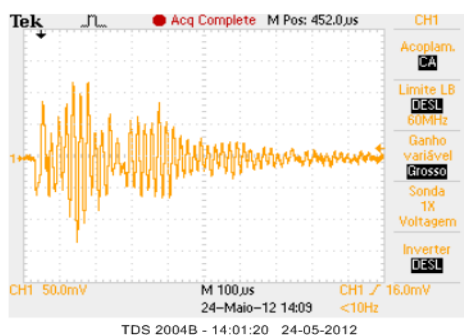
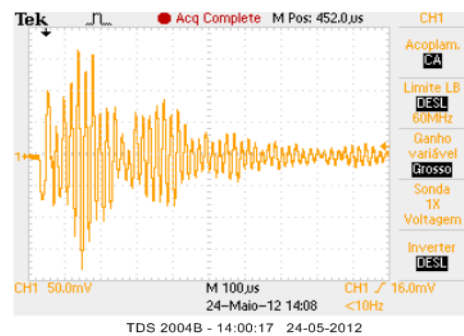
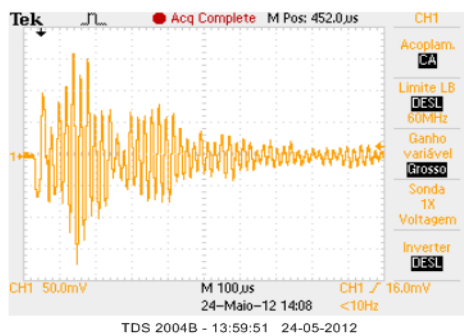
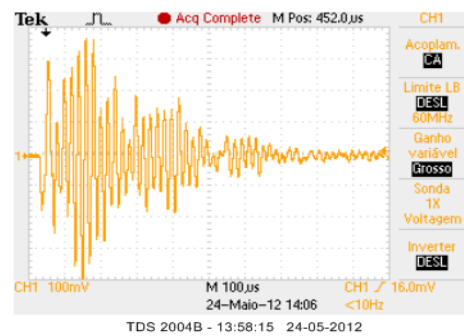
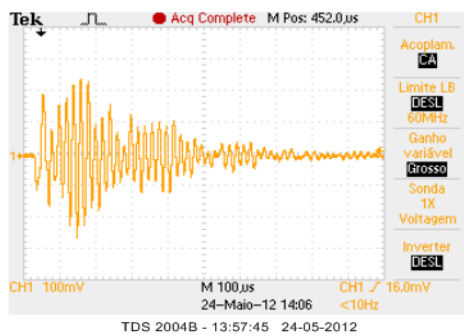


## E.1. Ondas Longitudinais obtidas pelo osciloscópio no ensaio de ultrassons

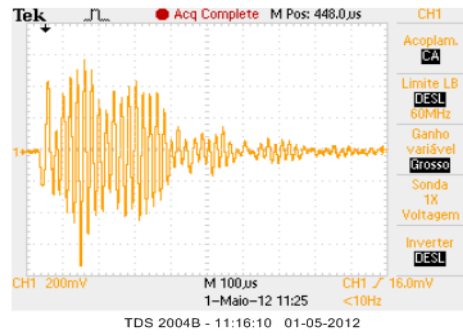
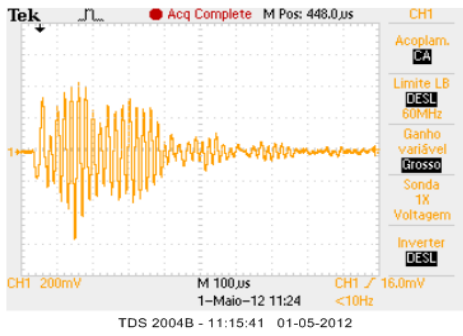
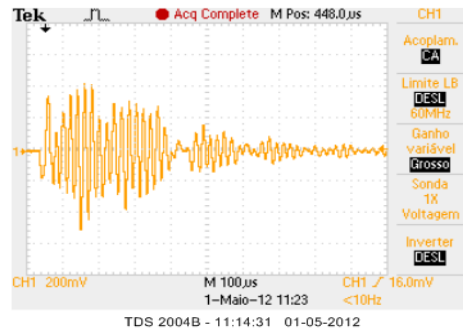
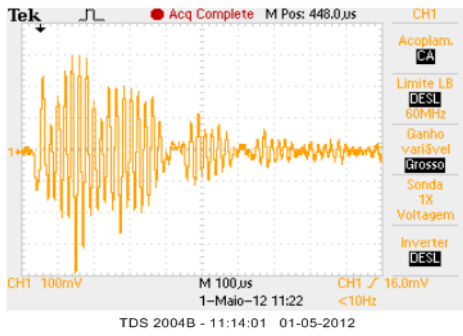
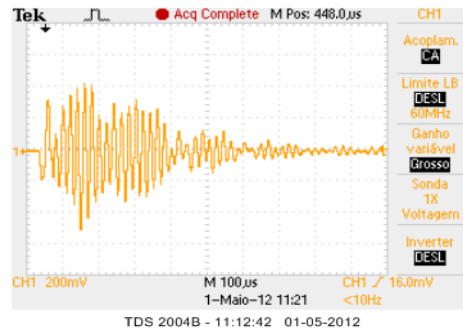
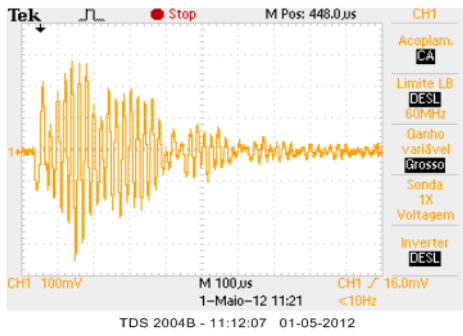
Apresenta-se de seguida a título de exemplo, as ondas obtidas pelo osciloscópio para a argamassa 100C-comSP- 1 dose utilizando os transdutores de 54 e 150 kHz.

→ Transdutores 54kHz

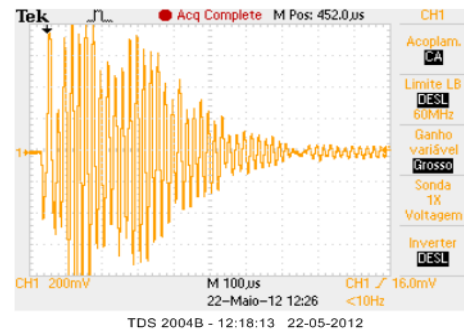
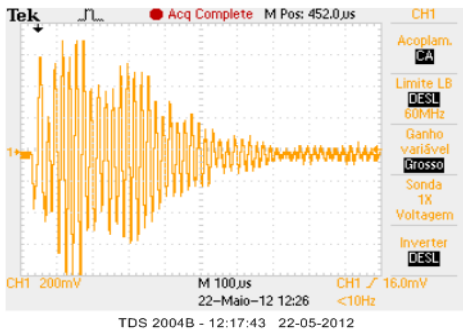
### 2 DIAS

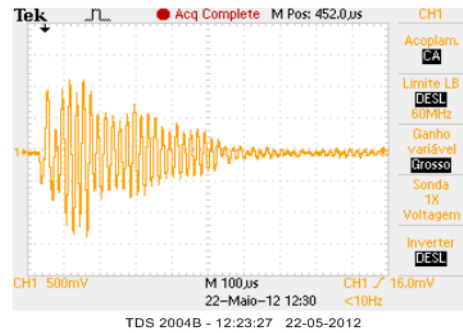
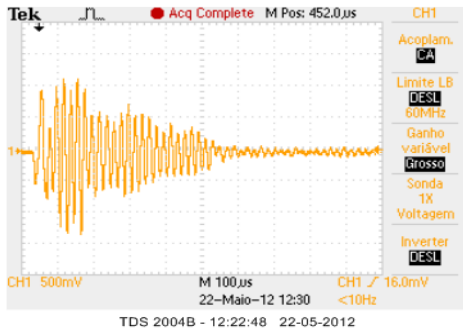
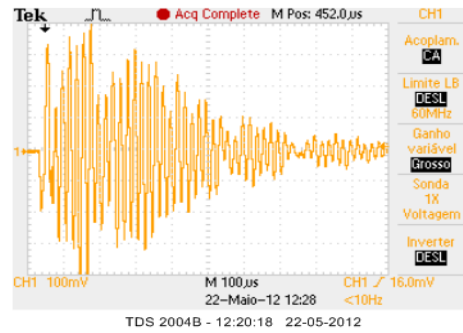
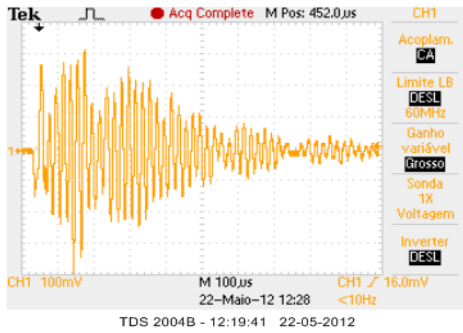


7 DIAS

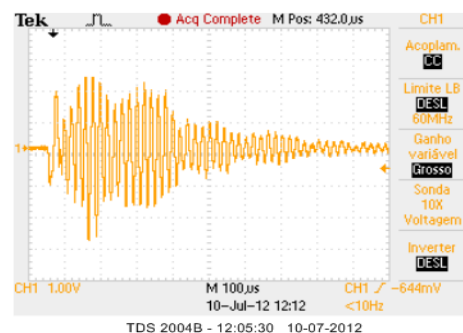
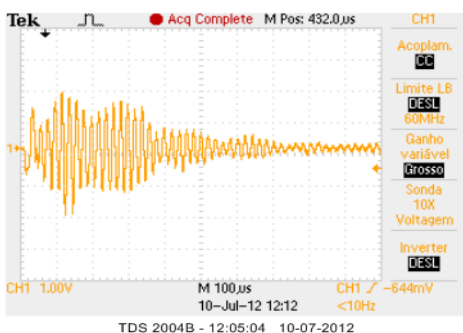
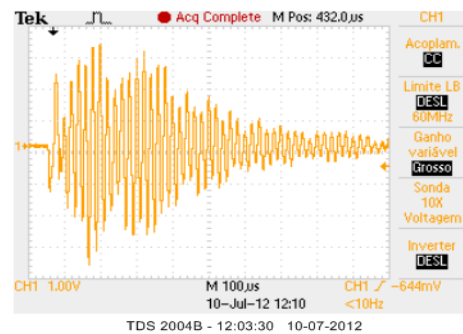
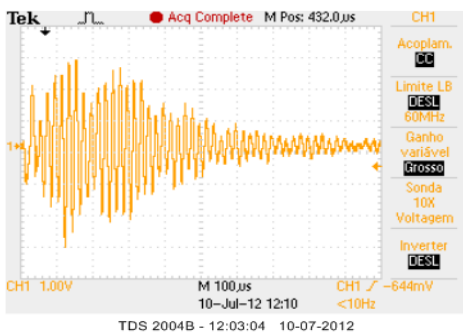


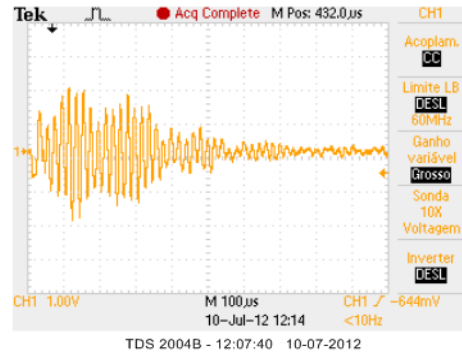
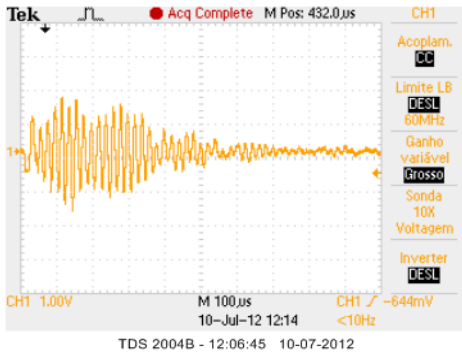
28 DIAS



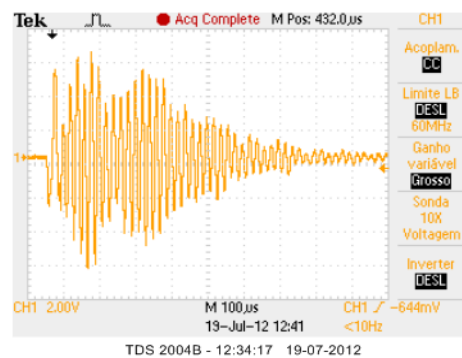
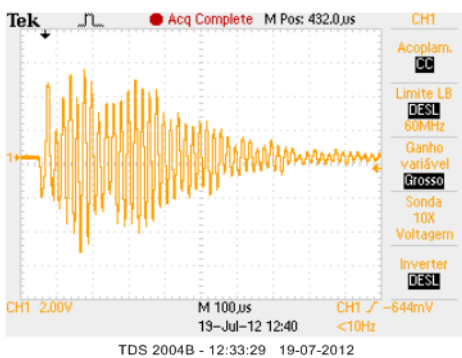
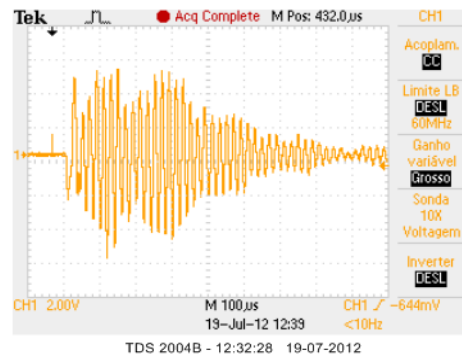
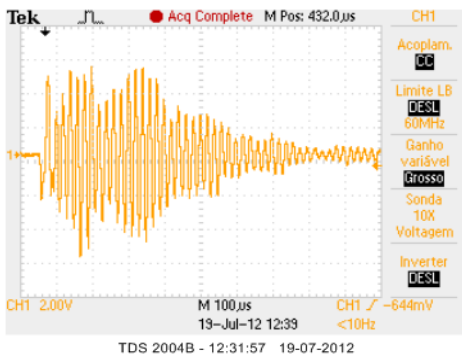
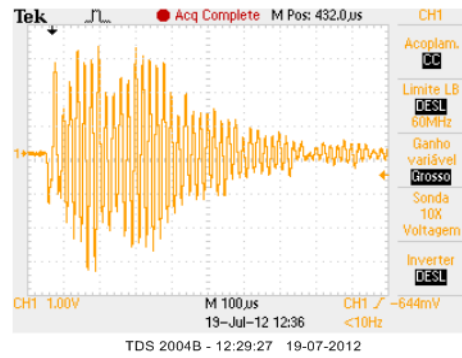
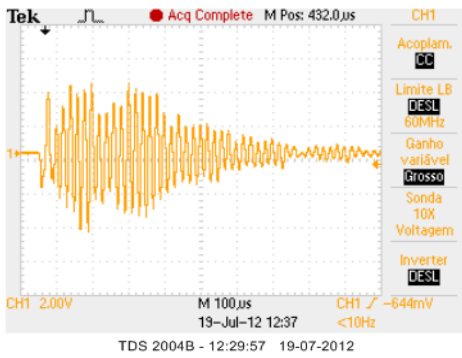


56 DIAS



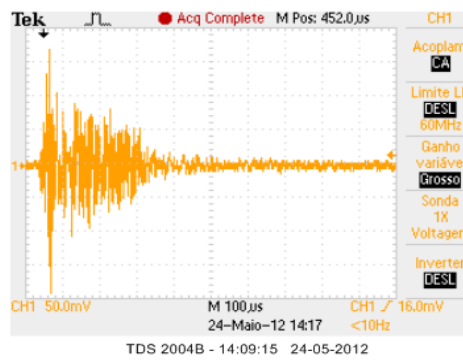
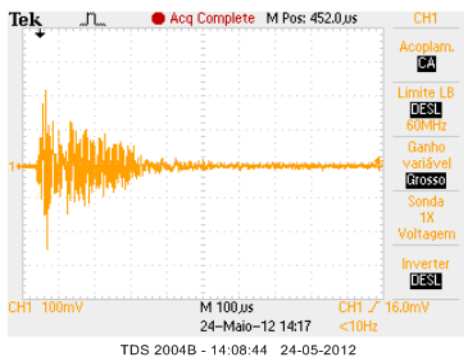
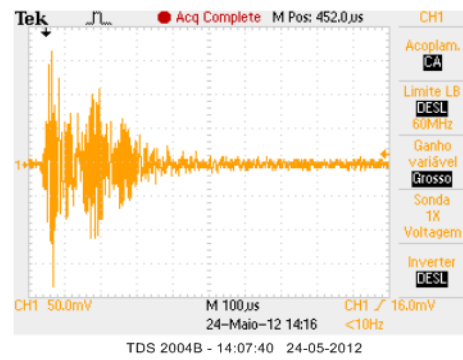
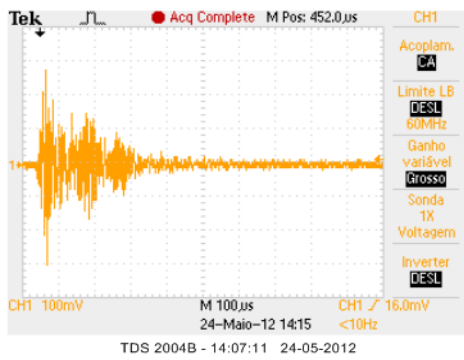
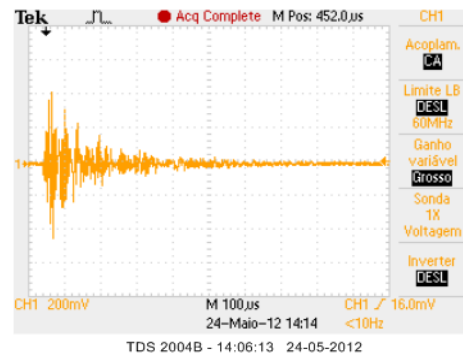
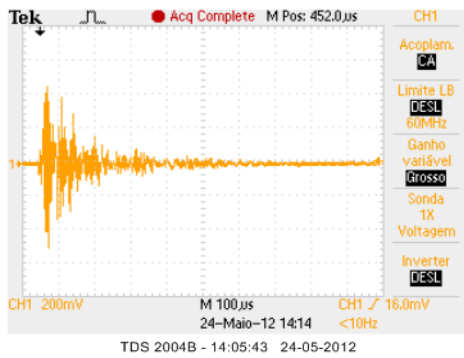


91 DIAS

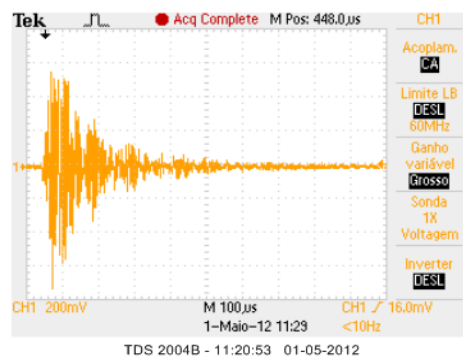
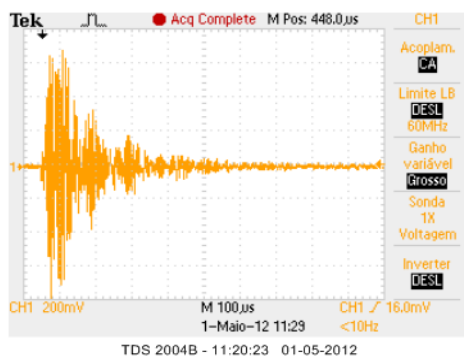


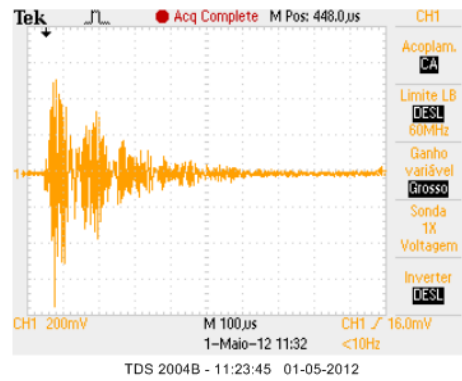
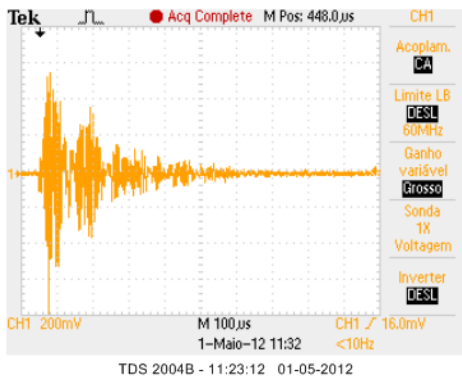
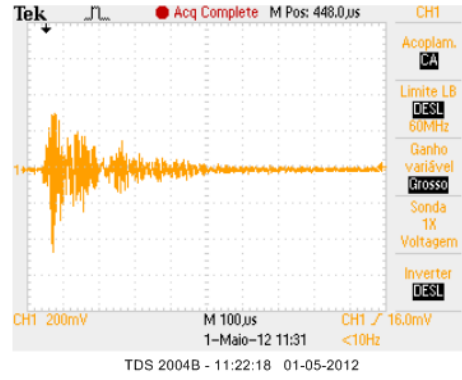
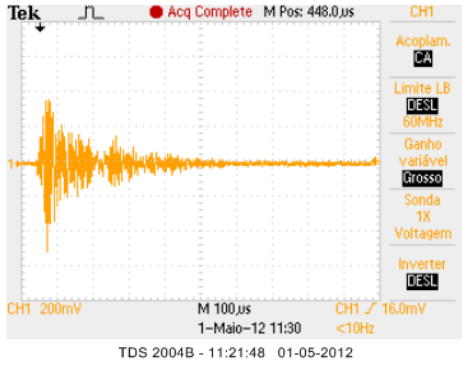
→ Transdutores 150kHz

2 DIAS

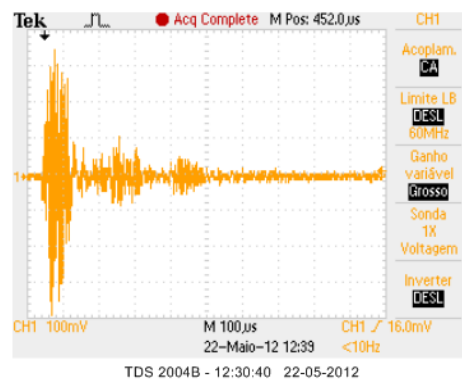
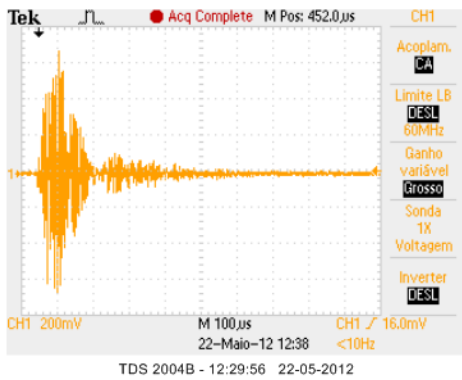
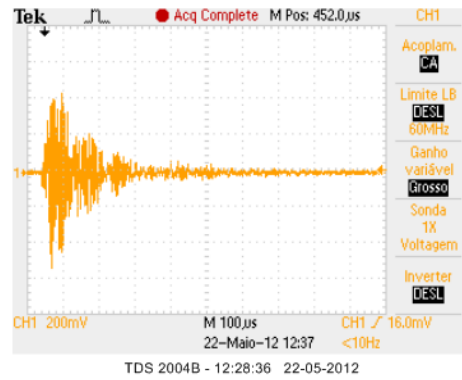
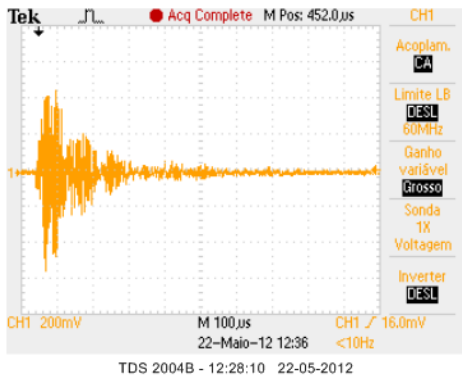


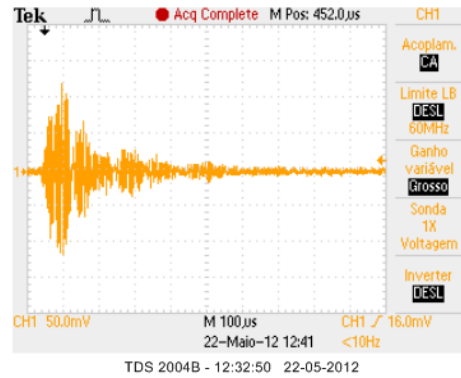
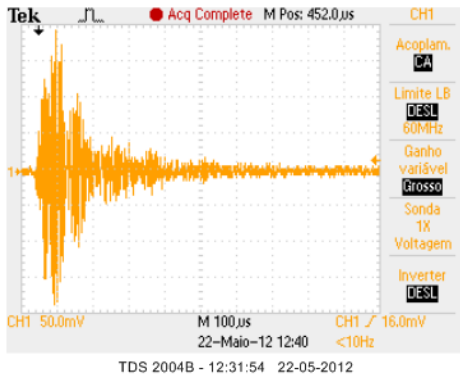
7 DIAS



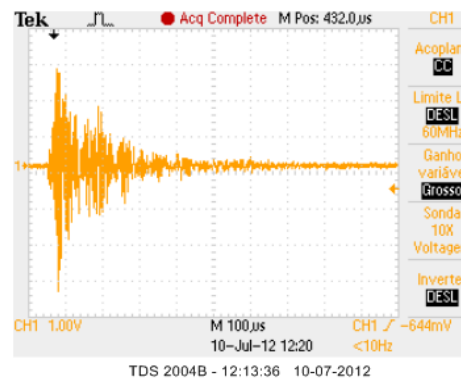
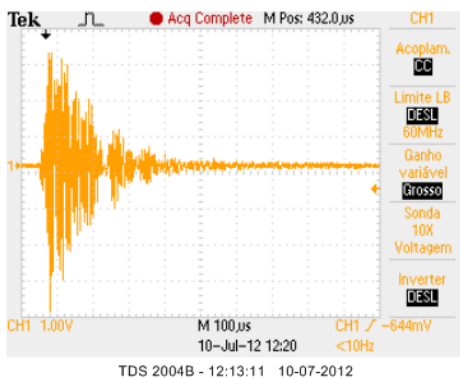
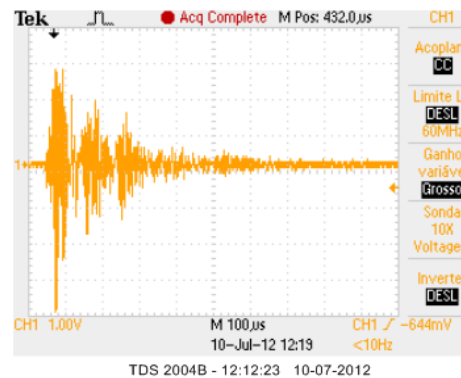
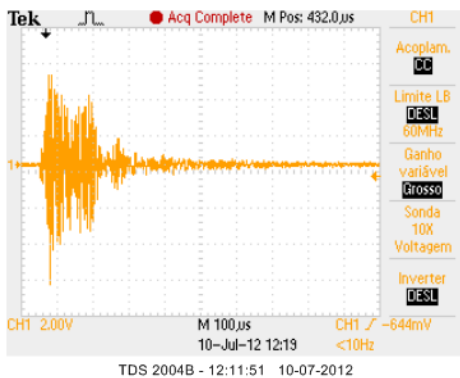
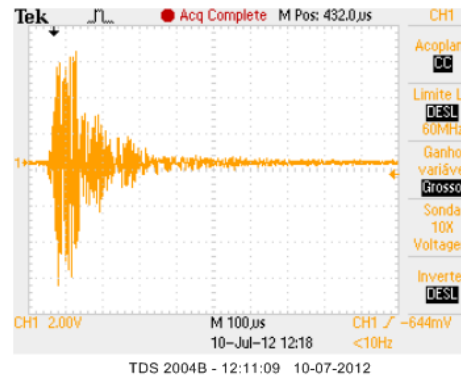
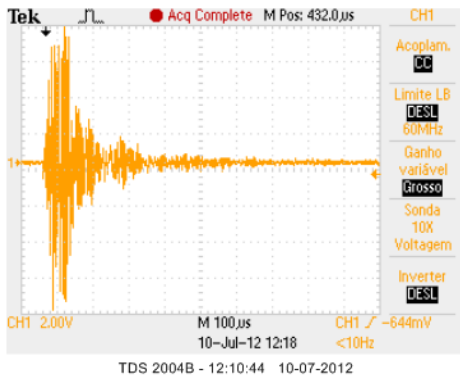


28 DIAS

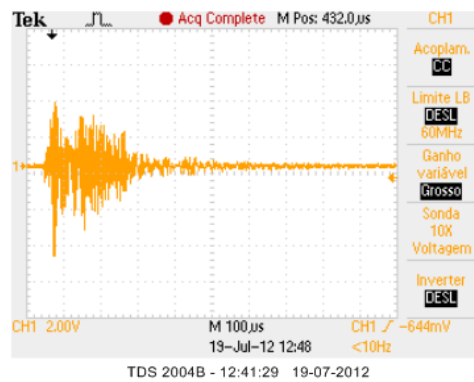
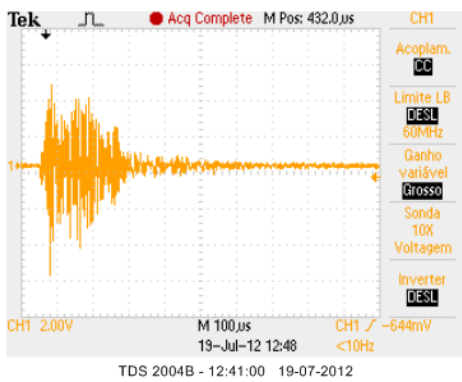
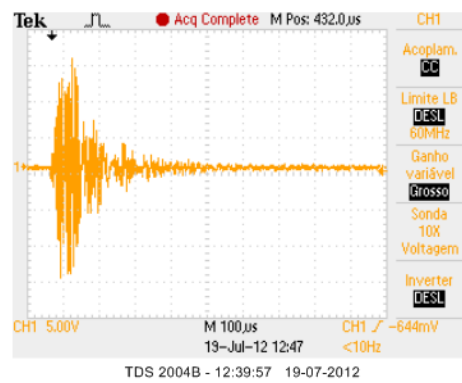
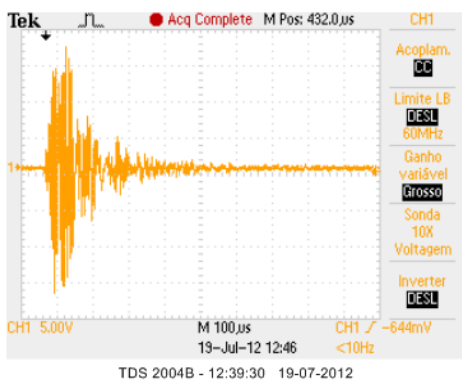
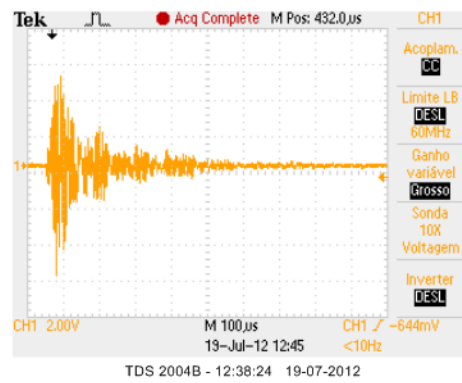
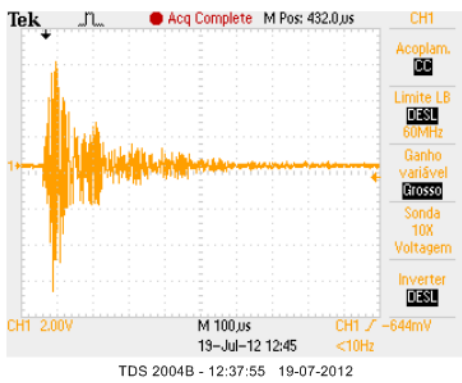




56 DIAS

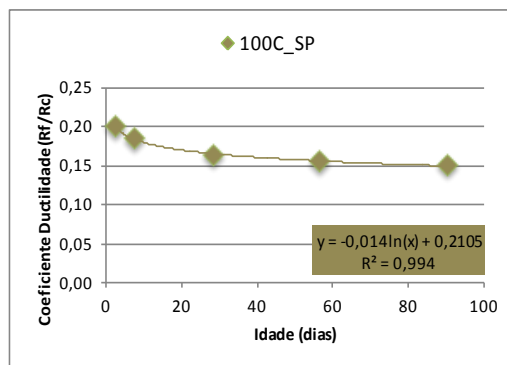
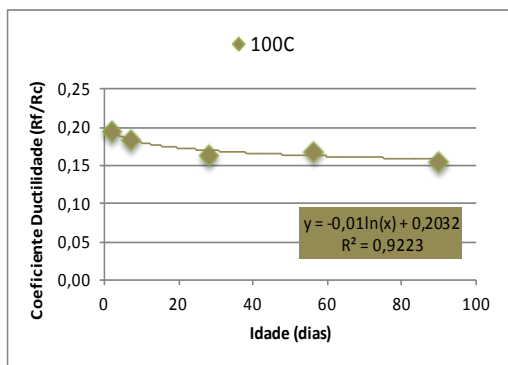


91 DIAS

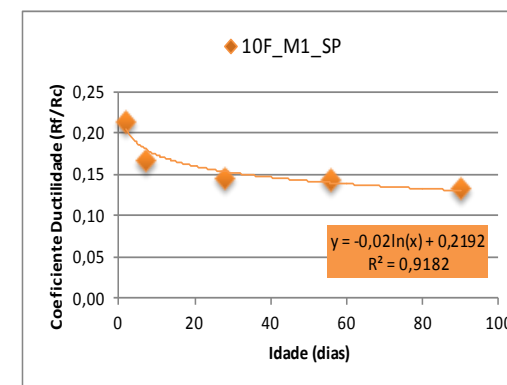
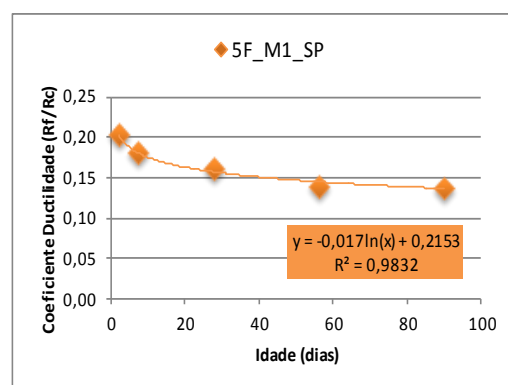
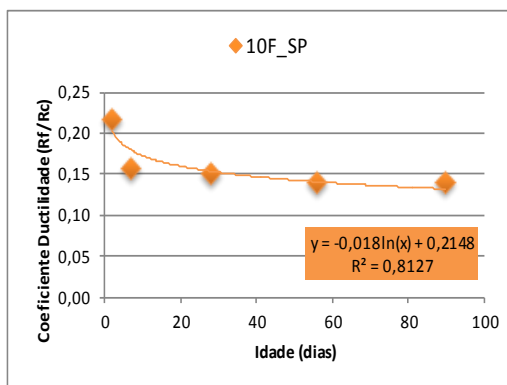
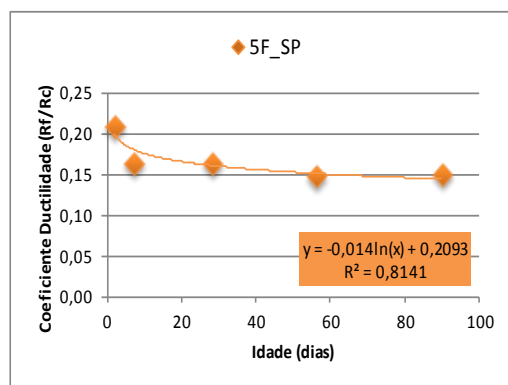


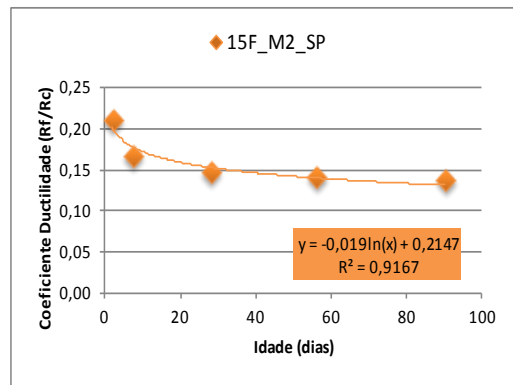
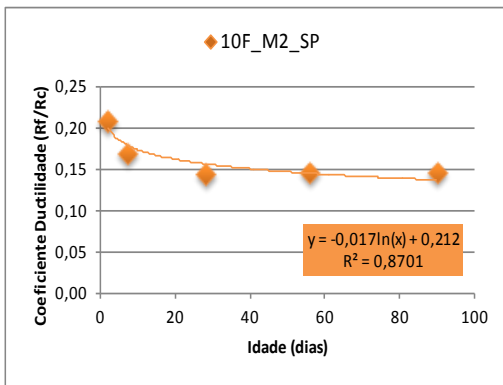
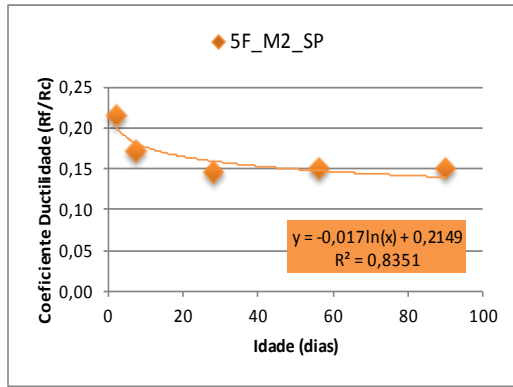
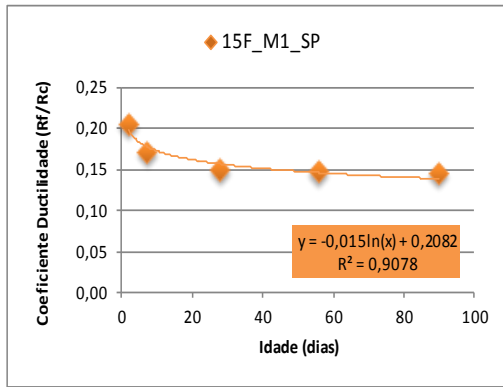
## E.2. Relação entre a resistência à flexão e compressão das diferentes argamassa estudadas (coeficiente de ductilidade)

→ Argamassas de Referência das duas séries

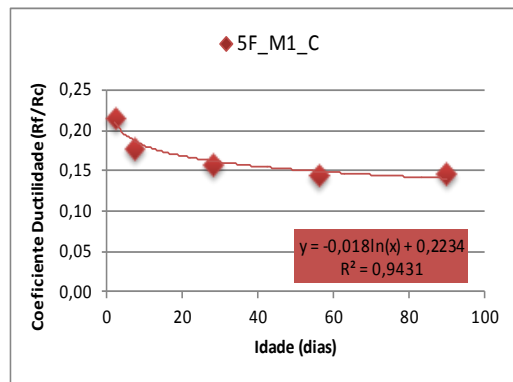
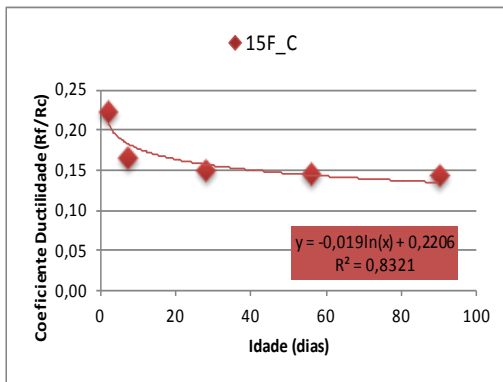
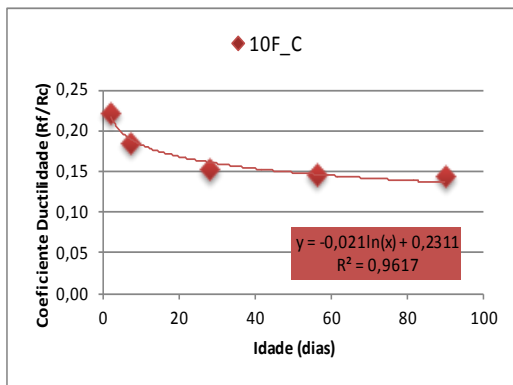
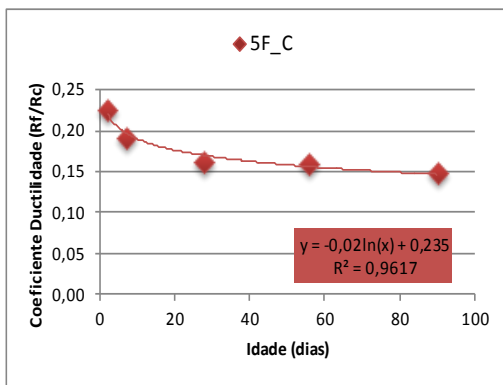


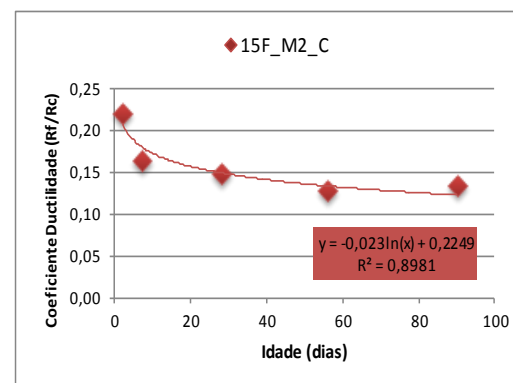
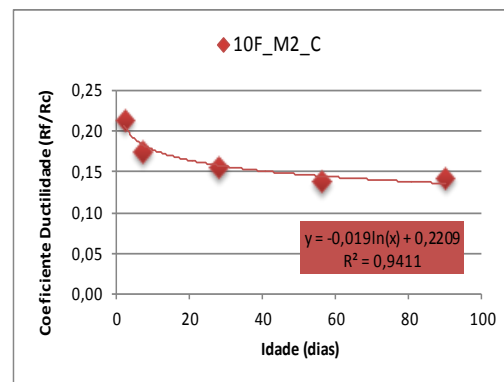
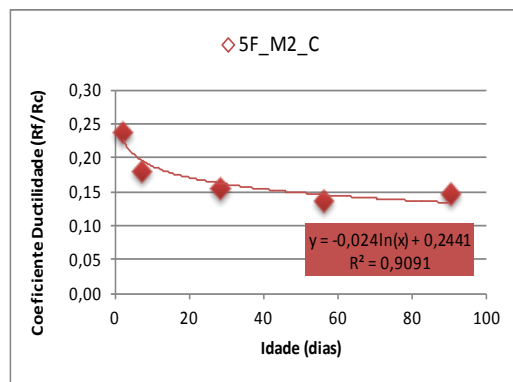
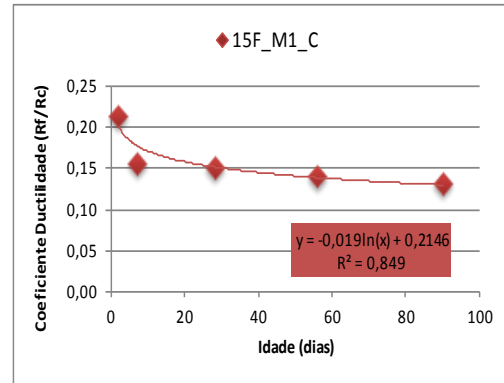
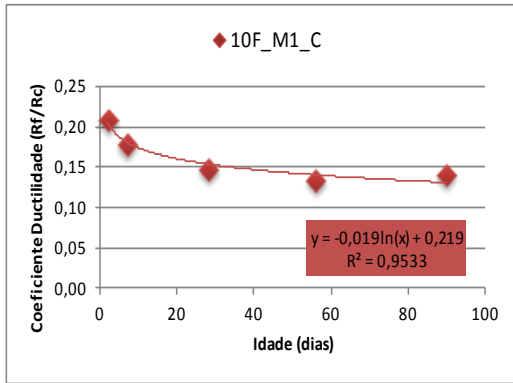
→ Série Teor SP constante





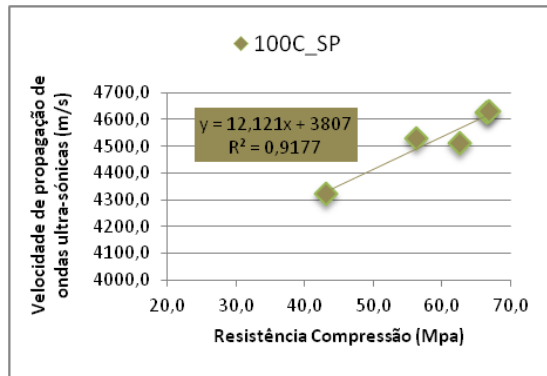
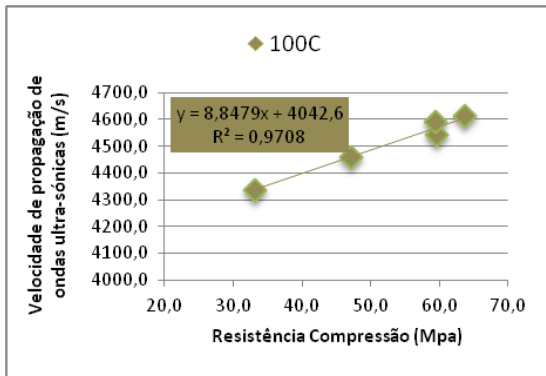
→ Série Consistência constante



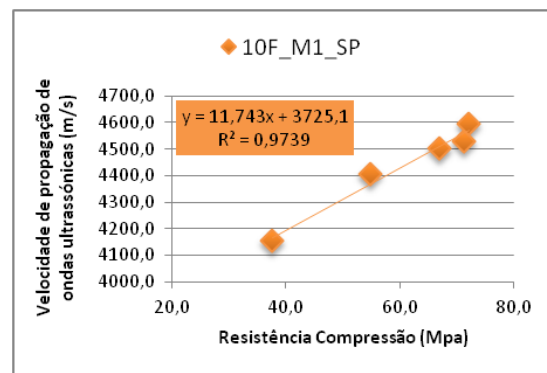
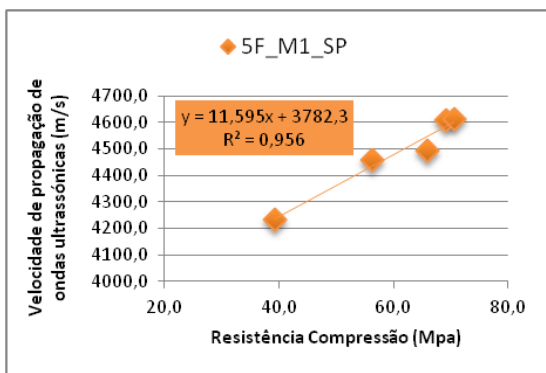
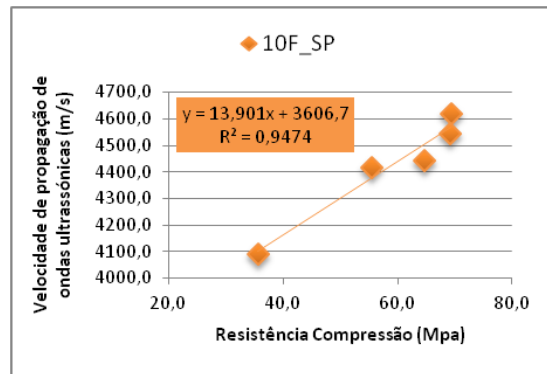
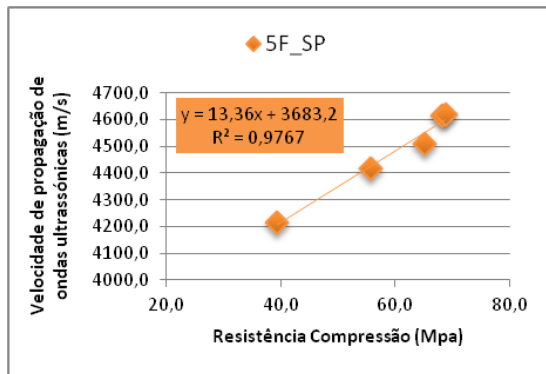


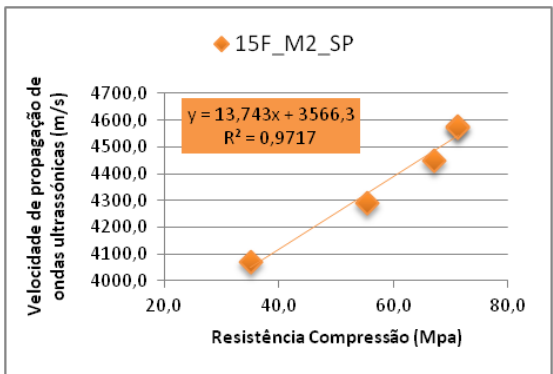
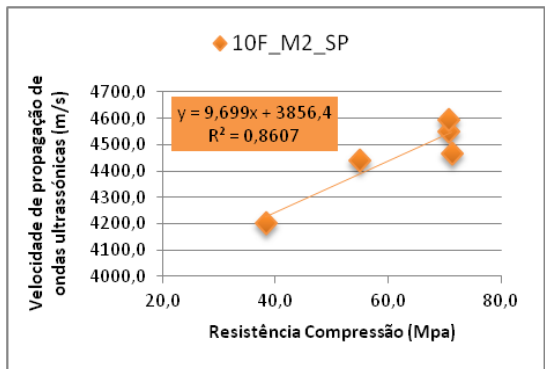
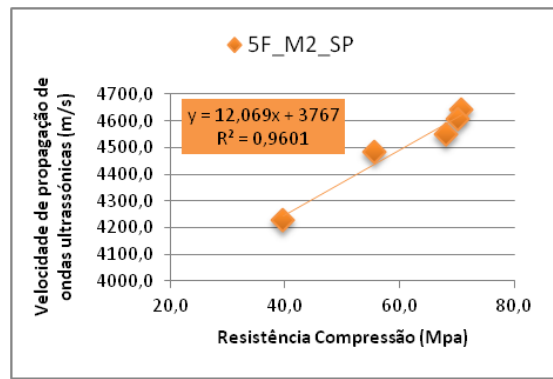
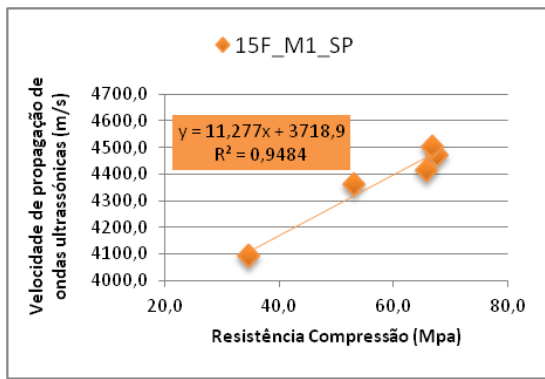
E.3. Relação entre a velocidade de ultrassons e a resistência à compressão das argamassas estudadas

→ Argamassas de Referência das duas Séries



→ Série Teor SP constante





→ Série Consistência constante

