



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

**Estudo de viabilidade da produção de Betões Auto-
Compactáveis com incorporação de Catalisador
exausto da Indústria Petroquímica**

JOSÉ LUÍS DOS SANTOS ANTÓNIO

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de
Lisboa

Trabalho Final de Mestrado para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil na
Área de Especialização de Edificações

Júri:

Presidente: Doutora, Maria da Graça Dias Alfaro Lopes

Vogais:

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa

Doutor, Paulo Alexandre Carapinha Marques

Mestre, Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Janeiro de 2013

Resumo

Na óptica de um contínuo progresso do conhecimento científico do betão enquanto material aplicado na construção civil, tem-se investigado, principalmente nas últimas três décadas, novos métodos para a sua composição e concepção, visando a sua optimização. Uma destas variantes é o Betão Auto-Compactável (BAC) capaz de se auto compactar apenas pela acção do próprio peso.

As características reológicas necessárias a este tipo de betões tornam particularmente importante que a sua composição inclua adições. Neste contexto, pretendeu-se avaliar a viabilidade de reutilizar catalisador exausto da unidade de “cracking” catalítico (FCC), produzido na refinaria de Sines, como adição na produção de BAC. A utilização deste material, com este fim, apresenta ainda as vantagens adicionais de diminuir o teor de cimento bem como constitui o aproveitamento dum subproduto industrial.

A actividade laboratorial teve por base o método de produção de BAC proposto por Okamura et al [1] com algumas modificações propostas por outros investigadores, nomeadamente, pelo Miguel Nepomuceno [2]. Esta metodologia de preparação de BAC prevê duas fases experimentais principais que incluem: (i) a preparação de argamassas e (ii) a preparação de betões. Neste sentido avaliou-se a possibilidade de preparar argamassas com a adição de 10 a 40%, em volume de catalisador exausto de FCC produzido na refinaria de Sines da empresa PETROGAL S.A..

Na fase experimental de estudo das argamassas no estado fresco realizaram-se ensaios de forma a estabelecerem-se os parâmetros reológicos. No estado endurecido das argamassas realizaram-se os ensaios de velocidade de propagação dos ultrassons, resistência à flexão e à compressão aos 7, 28 e 90 dias de idade de hidratação. Tendo em consideração os resultados experimentais obtidos com as argamassas preparou-se BACs com incorporação de catalisador exausto de FCC. Nestes BACs realizaram-se os seguintes ensaios - (i) no estado fresco: espalhamento; funil V, caixa L e anel J, e (ii) no estado endurecido: velocidade de propagação dos ultrassons; resistência à compressão; ensaios de absorção de água por capilaridade e imersão e ainda o ensaio de análise dimensional.

Deste modo, concluiu-se que: (i) foi possível preparar BACs com adição de catalisador exausto de FCC entre 10-25% de incorporação; (ii) os BACs preparados enquadraram-se normativamente, segundo o preconizado pela NP EN 206-9 [3], relativamente às propriedades no estado fresco, revelando uma extensa gama de aplicações nas construções de Engenharia Civil; e (iii) é expectável que uma optimização dos BAC (em trabalhos futuros) possa ainda vir a tornar mais extensa a gama de aplicações

Palavras-chave: Betão Auto-Compactável (BAC); Reutilização de resíduos industriais; Catalisador exausto da unidade de “cracking” catalítico (FCC)

Abstract

Envisioning a continuous progress in the scientific knowledge of concrete as an applied material in civil construction, there has been research mainly in the past three decades, of new methods for its composition and conception, envisioning its optimization. One of these variants is the Self-Compacting Concrete (SCC) capable of self-compacting by action of its own weight.

The rheological characteristics necessary for this type of concretes elevate the importance that its composition includes additions. In this context, it is intended to evaluate the viability of reutilizing exhausted catalyst from the cracking unit (FCC), produced in some petrol refineries, as an addition in the production of BAC. The utilization of this material, with this purpose, presents still the additional advantages of diminishing the concrete content as well as constituting a reutilization of an industrial byproduct.

The lab activity had its basis in the production method of BAC proposed by Okamura et al [1] with some modifications proposed by other investigators, namely, Miguel Nepomuceno [2]. This methodology of BAC preparing, predicts two main experimental phases that include: (i) the preparation of mortars and (ii) the preparation of concretes. In this sense it was evaluated the possibility of preparing mortars with the addition of 10 to 40 %, of exhausted FCC catalyst volume produced in the Petrogal S.A. Sines refinery.

In the experimental phase study of the mortar in the fresh state, tests were undertaken so that the rheological parameters could be established. The ultrasound speed propagation test, resistance to flexural and compressive strength to 7, 28 and 90 days of hydration were undertaken in the hardened state of the mortars. Taking into account the obtained experimental results with the mortars, BACs were prepared with incorporation of exhausted FCC catalyst. In these BACs the following tests were undertaken – (i) in the fresh state: slump flow; V funnel, L box and J ring, and (ii) in the hardened state: ultrasound propagation speed, compressive strength; water absorption tests by capillarity and immersion and also the dimensional analysis test.

It was therefore concluded that: (i) it was possible to prepare BACs with the addition of exhausted FCC catalyst in the range of 10-25 % of incorporation, (ii) the prepared BACs normatively adhere to the NP EN 206-9 [3] standards in regards to its properties in the fresh state, revealing an extended range of applications in Civil Engineering constructions; and (iii) it is expected that BAC optimization (in future studies) may yet extend further the range of applications.

Keywords: Self Compacting Concrete (SCC); Reuse of Industrial Waste; Waste catalyst from Fluidized Catalytic Cracking (FCC)

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar o meu profundo agradecimento à minha família, em especial aos meus pais, José e Madalena, por todo o seu incessante apoio ao longo da minha carreira académica. A sua presença, preocupação e postura incentivante foram aspectos imprescindíveis para o sucesso de todas as etapas e obstáculos.

À orientadora desta dissertação, a Doutora Carla Maria Costa, pelo seu grande profissionalismo e total disponibilidade que sempre mostrou no decurso da actividade laboratorial e da redacção deste documento, bem como pela compreensão que demonstrou face às adversidades que se foram colocando ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Àqueles que tive oportunidade de trabalhar, colegas e docentes, quer no ISEL como no LNEC, agradeço a forma abnegada como o fizeram, mostrando sempre um espírito de entajuda assinaláveis, em especial ao Engenheiro Pedro Silva pelo apoio e transmissão de conhecimentos que muito ajudaram ao planeamento e concretização da dissertação.

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

Pela cedência gratuita de materiais agradeço também à CIMPOR – Cimentos de Portugal, SGPS, S.A.; às empresas de produção de inertes para betão, nomeadamente a Central Unibetão de Ponte de Frielas; Petrogal e à SIKA.

Gostaria ainda de aproveitar esta oportunidade para enviar uma grande saudação aos inúmeros colegas, desta instituição, com quem tive a oportunidade de me cruzar ao longo da minha vida académica, pelos inesquecíveis bons momentos, amizade e solidariedade que sempre demonstraram para comigo. Pelas mesmas razões dirijo-me ainda ao Francisco Paulo, ex docente do ISEL e a todos aqueles que, embora sem ligações próximas com a instituição, me incentivaram e se mostraram preocupados com o meu sucesso. A todos eles um muito obrigado.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de direccionar o meu último agradecimento, de uma forma especialmente carinhosa, à Marina Marques, pela insubstituível pessoa que é, pela confiança e amor depositado em mim, aspectos que se mostraram cruciais para a conclusão e êxito desta dissertação.

Índice de Texto

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e justificação do tema	1
1.2	Objectivo	2
1.3	Metodologia adoptada.....	2
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	Revisão de literatura	5
2.1	Considerações iniciais	5
2.2	Origem do betão auto-compactável	5
2.3	Métodos e trabalhos desenvolvidos	6
2.4	Catalisador exausto FCC como adição ao cimento	7
2.4.1	Importância do uso de adições	7
2.4.2	Obtenção e características do catalisador	7
2.5	Propriedades do BAC.....	8
2.5.1	Auto-compactabilidade no estado fresco	9
2.5.1.1	Reologia	9
2.5.1.2	Trabalhabilidade	10
2.5.1.2.1	Capacidade de enchimento.....	10
2.5.1.2.2	Resistência à segregação.....	11
2.5.1.2.3	Capacidade de passagem	11
2.6	Método utilizado para a composição de BAC	12
2.6.1	Primeira fase.....	13
2.6.1.1	Cálculo da composição da argamassa	13
2.6.1.2	Ensaio conducentes aos parâmetros reológicos pretendidos	15
2.6.1.3	Metodologia para os acertos da reologia.....	16
2.6.2	Segunda fase.....	18
2.6.2.1	Cálculo da composição do betão.....	18
2.7	Classificação do BAC.....	21

2.7.1	Classes de consistência	22
2.8	Vantagens do BAC	23
2.9	Desvantagens do BAC.....	23
2.10	Casos de aplicação do BAC.....	23
3	Descrição da campanha laboratorial	27
3.1	Considerações gerais.....	27
3.2	Designação e composição das misturas estudadas	27
3.3	Esquematização das actividades	29
3.4	Materiais	32
3.4.1	Ligantes	33
3.4.1.1	Cimento.....	33
3.4.1.2	Adição.....	33
3.4.2	Agregado	33
3.4.2.1	Agregados finos.....	34
3.4.2.2	Agregado grosso	35
3.4.3	Água	37
3.4.4	Adjuvante.....	37
3.5	Argamassas.....	37
3.5.1	Preparação e dosagem dos constituintes	37
3.5.2	Amassadura.....	38
3.5.3	Ensaios a fresco.....	39
3.5.3.1	Ensaio de espalhamento	40
3.5.3.2	Ensaio de fluidez	41
3.5.4	Ensaios no estado endurecidos.....	43
3.5.4.1	Moldagem, desmoldagem e conservação dos provetes	43
3.5.4.2	Ensaio de ultrassons.....	44
3.5.4.3	Ensaio de resistência à flexão	46
3.5.4.4	Ensaio de resistência à compressão	47
3.6	Betões.....	48
3.6.1	Preparação e dosagem dos constituintes	48

3.6.2	Amassadura	49
3.6.3	Ensaio no estado fresco	49
3.6.3.1	Determinação do parâmetro Gc (ensaio de espalhamento).....	49
3.6.3.2	Determinação do parâmetro Rc (ensaio de fluidez)	51
3.6.3.3	Ensaio de Caixa L	52
3.6.3.4	Ensaio de anel J.....	54
3.6.4	Ensaio no estado endurecido.....	55
3.6.4.1	Ensaio de ultrassons	56
3.6.4.2	Ensaio de resistência à compressão	56
3.6.4.3	Ensaio da absorção de água por capilaridade	57
3.6.4.4	Ensaio da absorção de água por imersão	59
3.6.4.5	Ensaio de análise dimensional.....	60
4	Análise dos resultados obtidos	63
4.1	Considerações gerais.....	63
4.2	Argamassas.....	63
4.2.1	Caracterização no estado fresco	63
4.2.1.1	Acertos concertado da reologia	63
4.2.2	Caracterização do estado endurecido	69
4.2.2.1	Velocidade de propagação das ondas sónicas	69
4.2.2.2	Resistência à flexão	72
4.2.2.3	Resistência à compressão.....	75
4.3	Betões.....	83
4.3.1	Caracterização no estado fresco	83
4.3.1.1	Ensaio de espalhamento	83
4.3.1.2	Ensaio de fluidez.....	85
4.3.1.3	Ensaio de Caixa L	86
4.3.1.4	Ensaio de anel J.....	87
4.3.2	Enquadramento normativo	88
4.3.3	Caracterização no estado endurecido	88
4.3.3.1	Velocidade de propagação dos ultrassons	88
4.3.3.2	Resistência à compressão.....	91
4.3.3.3	Ensaio de absorção de água por capilaridade	97
4.3.3.4	Ensaio de absorção de água por imersão.....	102

4.3.3.5	Ensaio de análise dimensional	105
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	109
5.1	Conclusões gerais	109
5.2	Propostas para trabalhos futuros	112
ANEXOS.....		121
	ANEXO A - Planeamento da Actividade Laboratorial	Ai
	ANEXO B - Fichas técnicas dos materiais	Bi
	B.1 Cimento Portland (CEM I 42,5R).....	Biii
	B.2 Análise granulométrica por difracção de raios laser do cimento CEM I 42,5R e catalisador exausto de FCC usados em laboratório:.....	Bv
	B.3 Superplastificante	Bvii
	ANEXO C - Fichas de cálculo das amassaduras	Ci
	C.1 Ficha de cálculo para a argamassa A.100C	Ciii
	C.2 Ficha de cálculo para a argamassa A.90C + 10FCC	Civ
	C.3 Ficha de cálculo para a argamassa A.80C + 20FCC	Cv
	C.4 Ficha de cálculo para a argamassa A.75C + 25FCC	Cvi
	C.5 Ficha de cálculo para o betão B.100C.....	Cvii
	C.6 Ficha de cálculo para o betão B.90C + 10FCC	Cviii
	C.7 Ficha de cálculo para o betão B.80C + 20FCC	Cix
	C.8 Ficha de cálculo para o betão B.75C + 25FCC	Cx
	ANEXO D - Ondas longitudinais obtidas no osciloscópio	Di

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Classes de consistência dos BACs	22
Quadro 2.2 – Caso de aplicação do BAC – Ponte Akaishi-Kaiko	24
Quadro 2.3 – Caso de aplicação do BAC – Tanque de GNL	24
Quadro 2.4 – Caso de aplicação do BAC – Edifício Burj Dubai	25
Quadro 2.5 – Caso de aplicação do BAC – Torre do aeroporto de Arlannda	25
Quadro 2.6 – Caso de aplicação do BAC – MAXXI Museo	26
Quadro 3.1 – Designação das argamassas e betões.....	28
Quadro 3.2 – Constituintes usados e proveniência.....	32
Quadro 3.3 – Tipos de adições.....	33
Quadro 3.4 – Distribuição granulométrica das areias 0/1 e 0/4 e da mistura usada, 60 e 40 por cento respectivamente.	35
Quadro 3.5– Distribuição granulométrica das britas 1 e 2 e da mistura usada, 60 e 40 por cento de volume respectivamente	36
Quadro 4.1 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.100C.64	
Quadro 4.2 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.90C+10FCC.....	64
Quadro 4.3 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.80C+20FCC.....	64
Quadro 4.4 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.70C+30FCC.....	65
Quadro 4.5 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.60C+40FCC.....	65
Quadro 4.6 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.75C+25FCC.....	65
Quadro 4.7 – Quadro resumo dos valores V_w/V_p e $S_p/p\%$, de cada uma das composições, conducentes à reologia pretendida.....	69
Quadro 4.8 – Velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes de argamassa ensaiados e respectiva média e desvio padrão (DP)	70

Quadro 4.9 – Tensão de rotura à flexão dos provetes de argamassa ensaiados e respectiva média e desvio padrão.....	73
Quadro 4.10 – Perda de tensão à flexão com o aumento da incorporação de catalisador exausto de FCC	75
Quadro 4.11 - Tensão de rotura à compressão, aos 7 dias de idade, dos provetes de argamassa ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão	76
Quadro 4.12 - Tensão de rotura à compressão, aos 28 dias de idade, dos provetes de argamassa ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão	77
Quadro 4.13 . Tensão de rotura à compressão, aos 90 dias de idade, dos provetes de argamassa ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão	78
Quadro 4.14 – Índice de actividade dos provetes de argamassa com base na resistência à compressão.....	81
Quadro 4.15 – Tempo T500 e diâmetros alcançados nos betões no ensaio de espalhamento.....	83
Quadro 4.16 – Tempo de escoamento dos betões no ensaio do Funil V.....	85
Quadro 4.17 – Registo dos valores obtidos no ensaio da Caixa L	87
Quadro 4.18 – Registo dos valores obtidos no ensaio de Anel J.....	87
Quadro 4.19 – Classificações de consistência dos BACs preparados	88
Quadro 4.20 - Velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes de betão ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão (DP)	89
Quadro 4.21 - Tensão de rotura à compressão, aos 7 dias de idade, dos provetes de betão ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão	92
Quadro 4.22 - Tensão de rotura à compressão, aos 28 dias de idade, dos provetes de betão ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão	93
Quadro 4.23 - Tensão de rotura à compressão, aos 90 dias de idade, dos provetes de betão ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão	94
Quadro 4.24 - Índice de actividade dos provetes de betão com base na resistência à compressão.....	96
Quadro 4.25 – Registo dos dados (peso e altura de água), absorção, coeficiente de capilaridade e coeficiente de capilaridade das primeiras 6 horas de ensaio da composição de finos B.100C.....	98

Quadro 4.26 - Registo dos dados (peso e altura de água), absorção, coeficiente de capilaridade e coeficiente de capilaridade das primeiras 6 horas de ensaio da composição de finos B.90C+10FCC.....	98
Quadro 4.27 - Registo dos dados (peso e altura de água), absorção, coeficiente de capilaridade e coeficiente de capilaridade das primeiras 6 horas de ensaio da composição de finos B.80C+20FCC.....	99
Quadro 4.28 - Registo dos dados (peso e altura de água), absorção, coeficiente de capilaridade e coeficiente de capilaridade das primeiras 6 horas de ensaio da composição de finos B.75C+25FCC.....	99
Quadro 4.29 – Registo das massas m_1, m_2 e m_3 , absorção por imersão e variação de percentagem com incorporação de catalisador exausto de FCC.....	102
Quadro 4.30 – Valores das medições, e respectiva média, do ensaio de análise dimensional realizadas nos dois provetes de betão B.100C	106
Quadro 4.31 - Valores das medições, e respectiva média, do ensaio de análise dimensional realizadas nos dois provetes de betão B.90C+10FCC	106
Quadro 4.32 - Valores das medições, e respectiva média, do ensaio de análise dimensional realizadas nos dois provetes de betão B.80C+20FCC	107
Quadro 4.33 - Valores das medições, e respectiva média, do ensaio de análise dimensional realizadas nos dois provetes de betão B.75C+25FCC.....	107

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Comparação da mistura entre um BAC e um betão convencional	9
Figura 2.2 - Mecanismo de obtenção de auto-compactibilidade.....	9
Figura 2.3 – Mecanismo de bloqueio pela formação de pontes	12
Figura 2.4 – Intervalo de variação dos parâmetros reológicos adoptados	16
Figura 2.5 – Ajustamento reológico das amassaduras, alteração concertada dos parâmetros reológicos (V_w/V_p e $S_p/p\%$). Três casos possíveis.....	17
Figura 2.6 – Relação entre MN e H_2/H_1 quando D_m varia entre os 630 e 670 mm.....	19
Figura 2.7 – Ponte Akaishi-Kaiko.....	24
Figura 2.8 – Tanque de GNL.....	24
Figura 2.9 – Torre Burj Dubai	25
Figura 2.10 – Torre de controlo do aeroporto de Arlanda	25
Figura 2.11 – MAXXI Museo.....	26
Figura 2.12 – Edifícios Lagoas Park	26
Figura 2.13 – Edifício Expoland	26
Figura 2.14 – Cineteatro Municipal do Cartaxo	26
Figura 3.1 – Esquematização da primeira fase: preparação das argamassas	30
Figura 3.2 – Esquematização da segunda fase: preparação dos betões	31
Figura 3.3 - Curva granulométrica das Areias 0/1 e 0/4 e respectiva mistura(60% e 40% de volume respectivamente).....	35
Figura 3.4 – Curva granulométrica das Britas 1 e 2 e respectiva mistura (60% e 40% de volume respectivamente).....	37
Figura 3.5 – Sequência da amassadura das argamassas	38
Figura 3.6 – Realização da amassadura de argamassa: a) pesagem do catalisador exausto de FCC; b) pesagem do superplastificante; c) introdução à passagem do 1º minuto de amassadura dos 20% de água misturada com superplastificante; d) pausa para limpeza.....	39
Figura 3.7 – Ensaio de espalhamento das argamassas. a) dimensões do molde de ensaio; b) leituras diametrais d_1 e d_2 após estabilização da argamassa	40

Figura 3.8 – Fases do ensaio de espalhamento: a) enchimento do molde; b) rasamento do topo do molde; c) medição diametral.....	41
Figura 3.9 Ensaio de fluidez das argamassas. Dimensões do funil V.....	42
Figura 3.10 – Fases do ensaio de fluidez das argamassas: a) enchimento do funil; b) cronometragem.....	42
Figura 3.11 – Moldagem e desmoldagem das argamassas: a) identificação dos provetes; b1) e b2) conservação dos provetes na horizontal na câmara de cura	44
Figura 3.12 – Ensaio de ultrassons: a) esquema de ligação do aparelho ao provete; b1) e b2) ligação e manuseamento no laboratório respectivamente.....	46
Figura 3.13 – Ensaio mecânico das argamassas: a) aparelho de compressão e flexão; b) provete para ensaio à flexão; c) pedaço do provete após ter sido sujeito ao ensaio de compressão.....	48
Figura 3.14 – Sequência da amassadura dos betões	49
Figura 3.15 – Ensaio de espalhamento nos betões: a)exemplificação e medidas; b)medida diametral	50
Figura 3.16 – Ensaio de fluidez dos betões: a) medidas do aparelho; b) início da abertura da comporta seguida de cronometragem.....	52
Figura 3.17 – Ensaio caixa L: a) dimensões do aparelho; b) enchimento da caixa para realização do ensaio	53
Figura 3.18 – Ensaio de anel J: dimensões do anel.....	54
Figura 3.19 – Preparação dos provetes para os ensaios no estado endurecido a) enchimento dos moldes; b) identificação dos provetes; c) conservação em água na câmara de cura	56
Figura 3.20 – Ensaio de compressão dos betões: provete após o ensaio	57
Figura 3.21 – Provetes, e respectiva identificação, do ensaio de absorção por capilaridade	59
Figura 3.22 – Ensaio de absorção por imersão, pesagem da massa hidrostática	60
Figura 3.23 Ensaio de análise dimensional, leitura da retracção/expansão através do extensómetro	61
Figura 4.1 – Valores dos parâmetros reológicos (Rm e Gm) das amassaduras realizadas da composição de finos A.100C obtidos através do acerto concertado dos parâmetros de composição Vw/vp e Sp/p%	66

Figura 4.2 – Valores dos parâmetros reológicos (Rm e Gm) das amassaduras realizadas da composição de finos A.90C+10FCC obtidos através do acerto concertado dos parâmetros de composição Vw/vp e Sp/p%	66
Figura 4.3 – Valores dos parâmetros reológicos (Rm e Gm) das amassaduras realizadas da composição de finos A.80C+20FCC obtidos através do acerto concertado dos parâmetros de composição Vw/vp e Sp/p%	67
Figura 4.4 – Valores dos parâmetros reológicos (Rm e Gm) das amassaduras realizadas da composição de finos A.75C+25FCC obtidos através do acerto concertado dos parâmetros de composição Vw/vp e Sp/p%	67
Figura 4.5 – Variação do valor Vw/Vp com o aumento da percentagem de adição de catalisador exausto de FCC na composição (Recta demonstrativa da correlação linear existente).....	68
Figura 4.6 - Variação do valor Sp/p% com o aumento da percentagem de adição de catalisador exausto de FCC na composição. (Recta demonstrativa da correlação linear existente).....	68
Figura 4.7 – Velocidade média de propagação dos ultrassons das argamassa nas idades de referência (7, 28 e 90 dias)	71
Figura 4.8 - Evolução da velocidade de propagação média dos ultrassons dos provetes de betão ao longo do tempo de hidratação.....	71
Figura 4.9 - Tensão média de rotura à flexão dos provetes de argamassa nas idades de referência (7, 28 e 90 dias)	74
Figura 4.10 –Tensão média de rotura à compressão dos provetes de argamassa nas idades de referência (7, 28 e 90 dias).....	79
Figura 4.11 - Evolução da tensão média de rotura à compressão dos provetes de argamassa para as diferentes composições de finos.	79
Figura 4.12 - Evoluir da resistência à compressão das argamassas das três idades de ensaio para as diferentes percentagens de FCC.....	80
Figura 4.13 – Valores T500, do ensaio de espalhamento, para as diferentes percentagens de catalisador exausto de FCC.....	84
Figura 4.14 – Valores do diâmetro de espalhamento, dos betões, para diferentes incorporações de catalisador exausto de FCC.....	84

Figura 4.15 – Valores do tempo de escoamento do betão, no ensaio do Funil V, em betões diferentes incorporações de catalisador exausto de FCC	86
Figura 4.16 - Velocidade média de propagação dos ultrassons dos betões nas idades de referência (7, 28 e 90 dias)	90
Figura 4.17 – Evolução da velocidade de propagação média dos ultrassons no betão ao longo do tempo de hidratação.	90
Figura 4.18 – Tensão média de rotura à compressão dos provetes de argamassa nas idades de referência (7, 28 e 90 dias).....	95
Figura 4.19 – Evolução da tensão média de rotura à compressão dos provetes de betão para as diferentes composições de finos.	95
Figura 4.20 - Evoluir da resistência à compressão dos betões das três idades de ensaio para as diferentes percentagens de catalisador exausto de FCC.....	96
Figura 4.21 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo.	100
Figura 4.22 – Ajuste das rectas que dão origem aos coeficientes de absorção capilar, através do seu declive.	100
Figura 4.23 – Altura média de água medida ao longo de 4 geratrizes nos provetes de betão no ensaio de absorção por capilaridade.	101
Figura 4.24 - Percentagem de absorção por imersão de água das diferentes incorporações de catalisador exausto de FCC.....	103
Figura 4.25 – Perda de água pelos provetes, na estufa, no ensaio de absorção por imersão, ao longo do tempo, até se atingir massa constante.	103
Figura 4.26 – Correlação linear dos betões entre os resultados de absorção por imersão e a resistência à compressão aos 90 dias de hidratação, nos BAC com incorporação de catalisador exausto de FCC.....	104
Figura 4.27 – Evolução da dimensão dos provetes de betão ao longo de 90 dias das diferentes composições de incorporação de catalisador exausto de FCC.....	108

Lista de Siglas e Símbolos

Sigla/Símbolo	Significado	Unidade
Aci	Absorção de água no tempo t_i (capilaridade)	g/mm^2
Ai	Absorção de água por imersão	%
APEB	Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto	
BAC	Betão Auto-Compactável	
CO₂	Dióxido de Carbono	
D0	Diâmetro da base do cone	Mm
Dm	Diâmetro médio das leituras no ensaio de espalhamento	Mm
fa	Percentagem de adição na mistura de finos	%
fc	Percentagem de cimento na mistura de finos	%
FCC	Sigla inglesa para: Catalisador do “cracking” catalítico em leito fluidizado	
Gc	Parâmetro reológico referente à área de espalhamento relativa no ensaio de espalhamento do betão	
Gm	Parâmetro reológico referente à área de espalhamento relativa no ensaio de espalhamento da argamassa	
H2/H1	Razão da altura alcançada pelo betão na extremidade da caixa (H2) e na coluna vertical (H1), no ensaio da Caixa L	
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa	
JSCE	“Japan Society of Civil Engineers”	
Kc	Coefficiente de capilaridade	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil	
MN	Sigla inglesa para: Número de Mistura	

Rc	Parâmetro reológico referente à velocidade relativa de escoamento no ensaio de fluidez de betão	s^{-1}
Rm	Parâmetro reológico referente à velocidade relativa de escoamento no ensaio de fluidez de argamassa	s^{-1}
SCC	Sigla inglesa para: Betão Auto-Compactável	
Sp	Volume de superplastificante na mistura	l/m^3
Sp/p%	Razão percentual, em massa, entre as quantidades totais de superplastificante e materiais finos da mistura	
t	Tempo de escoamento	Seg
T500	Tempo em que o betão demora a atingir o diâmetro de 500mm no ensaio de espalhamento	Seg
Vg	Volume absoluto dos agregados grosso	m^3/m^3
Vm	Volume absoluto da argamassa na mistura	m^3/m^3
Vm/Vg	Razão, em volume absoluto, entre as quantidades de argamassa e agregado grosso da mistura	
Vp	Volume absoluto dos materiais finos	m^3/m^3
Vp/Vs	Razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais dos materiais finos e dos agregados finos da mistura	
Vs	Volume absoluto dos agregados finos	m^3/m^3
Vsp	Volume de superplastificante	m^3/m^3
Vsp/Vp	Razão, em volume absoluto, entre as quantidades de superplastificante e de materiais finos da mistura	
Vv	Volume de vazios na mistura	m^3/m^3
Vw	Volume de água na mistura	m^3/m^3
Vw/Vp	Razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais de	

água e dos materiais finos da mistura		
a	Massa volúmica da adição	Kg/ m ³
c	Massa volúmica do cimento	Kg/ m ³
p	Valor médio da massa volúmica dos finos	Kg/ m ³
sp	Massa volúmica do superplastificante	Kg/ m ³
	Retracção/expansão das peças de betão	mm/mm

1 Introdução

1.1 Enquadramento e justificação do tema

Com o crescimento em massa das actividades na área da construção civil cresceu também, junto da comunidade científica, a necessidade de criar novas soluções para dar resposta à rapidez deste mesmo crescimento. A escassa mão-de-obra especializada para o manuseamento e aplicação do betão, bem como os custos e a morosidade da vibração do betão em obra, constituíram uma serie de problemas que emergiram nas últimas décadas neste sector. [4]

Para dar resposta a estas dificuldades, surgiu pela primeira vez no Japão, no início da década de 80, e posteriormente estudado e desenvolvido em outros países, uma nova tipologia de betão, o Betão Auto-Compactável (BAC), que se referenciou como um betão com características reológicas adequadas capazes de colmatar estes entraves que o sector da construção se tinha vindo a deparar, sem por em causa os parâmetros de trabalhabilidade, durabilidade e resistência exigidos.

Não obstante da sua componente sócio-económica é necessário contextualizar o estudo e concepção de produtos de base cimentícia também na sua vertente ambiental, pois para além do impacte visual causado ao meio pelo desgaste da extracção da matéria-prima, é requerido uma forte dosagem energética e libertado uma quantidade muito significativa de CO₂ para atmosfera aquando da produção do clínquer, contribuindo assim este processo para o agravamento de um dos tópicos mais sensíveis das preocupações ambientais da actualidade: a alteração climática do planeta.

É, então, do resultado das dificuldades construtivas e das preocupações com o ambiente que se urge dar resposta a estes problemas e se insere este trabalho contribuindo para a verificação da viabilidade através de uma metodologia de composição de betão com substituição parcial de cimento através da reutilização de material cimentício proveniente da indústria petrolífera, o catalisador exausto FCC¹, havendo também neste ponto uma contribuição para a mitigação de danos ambientais, tendo como base uma cuidadosa e planeada campanha laboratorial.

¹ Do inglês - *Fluidized Catalytic Cracking*.

1.2 Objectivo

Este trabalho visa a investigação de um potencial novo tipo de mistura cimentícia correspondendo, ou até superando, às demais exigências colocadas ao desempenho do BAC, através da análise de resultados de ensaios de resistência mecânica e durabilidade realizados numa campanha em laboratório com diversas amassaduras de argamassa e betão. Sintetizando-se pretende-se saber:

- a viabilidade da produção de BACs com incorporação de catalisador exausto FCC;
- a percentagem de adição de catalisador que é possível introduzir na composição;
- classificação normativa dos BACs, com incorporação de catalisador exausto de FCC, no estado fresco.

1.3 Metodologia adoptada

Para o cumprimento desta dissertação foi seguida a seguinte abordagem a fim de se alcançar o objectivo proposto:

- a) Recolha e revisão de bibliografia referente à matéria estudada ao longo deste trabalho com objectivo de consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico e actualizar o estado actual do conhecimento;
- b) Definição e calendarização da campanha experimental;
 - Aquisição e caracterização dos materiais a usar nas amassaduras;
 - Elaboração de folhas de cálculo de apoio à actividade laboratorial nomeadamente ao cálculo das quantidades dos materiais constituintes nas diferentes amassaduras de argamassa e de betão;
 - Realização das amassaduras das diferentes argamassas a fim fazer o respectivo acerto ao comportamento reológico pretendido através dos ensaios no estado fresco e posteriores ensaios de resistência mecânica aos 7, 28 e 90 dias;
 - Após determinação dos parâmetros conducentes à reologia pretendida, e respectivos ensaios mecânicos nas argamassas, foi realizada as amassaduras de betão efectuando ensaios no estado fresco e endurecido também nos dias de referência 7, 28 e 90;

- c) Após análise, comparação e conclusão dos resultados obtidos no laboratório tendo em conta as diferentes composições que era pretendido estudar e verificar o seu comportamento relativamente às diferentes percentagens de substituição de cimento;
- d) Este trabalho de investigação teve o seu término com a redacção desta dissertação que conta na sua estrutura com a compilação dos diferentes capítulos que a seguir se apresentam.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação conta com 5 capítulos e encontra-se apresentada e organizada do seguinte modo:

Capítulo 1 – onde é dado a conhecer de forma sucinta a contextualização e importância na actualidade do tema da dissertação, os objectivos que foram delineados e método a utilizar bem como toda a estrutura da redacção;

Capítulo 2 – apresenta o resumo da revisão da literatura que serviu para o fortalecimento do conhecimento teórico que esteve na base da elaboração e planeamento das actividades laboratoriais. Incluem-se a evolução do BAC até ao presente, casos de estudo e alguns métodos de composição utilizados até aos dias de hoje, reutilização do catalisador exausto FCC e os seus benefícios para o ambiente.

Capítulo 3 – descreve a campanha laboratorial, ou seja, os ensaios e respectivos procedimentos adoptados bem como os materiais constituintes;

Capítulo 4 – capítulo reservado à apresentação e análise dos resultados obtidos em todos os ensaios que foram realizados para as argamassas e betões produzidos no laboratório. Comparação e análise dos dados com resultados anteriores;

Capítulo 5 – capítulo último prestado às conclusões finais. Serão indicados também propostas de trabalhos de interesse para a continuação e desenvolvimento de investigação futura no domínio do tema desta dissertação.

2 Revisão de literatura

2.1 Considerações iniciais

O material utilizado com maior frequência na construção civil é o betão, sendo que o betão auto-compactável (BAC) surge nesta vertente como uma otimização das características do betão convencional. O BAC pode ser distinguido dos betões convencionais pelas propriedades apresentadas no estado fresco, conciliando uma grande fluidez e uma boa resistência à segregação. A sua aplicação e estabilização em obra é conseguida apenas pelo efeito da gravidade, ou seja, sem precisar de qualquer tipo de vibração exterior para o completo preenchimento dos moldes numa cofragem:

- Podendo potencialmente economizar os custos da betonagem e aumentar a rapidez na execução da obra;
- Melhorando as condições atmosféricas das zonas adjacentes das obras.

Os constituintes do BAC são, de um modo geral, os mesmos que os do betão convencional: cimento, água, agregados, adições e adjuvantes, embora os dois últimos tenham especial importância para a performance do BAC. Enquanto as adições (Tipo I ou Tipo II) conferem ao BAC uma coesão e resistência à segregação acrescidas, a adequada dosagem de adjuvante, do tipo superplastificante, confere um nível de fluidez elevado mas também estável e homogéneo para que este não segregue, por exemplo, à passagem do agregado grosso nas armaduras de aço [5].

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer a história, o desenvolvimento, as propriedades, a metodologia cumprida no laboratório, a explicação da escolha da composição nomeadamente do catalisador exausto FCC como adição à mistura de finos², as vantagens e desvantagens bem como alguns casos de aplicação do BAC.

2.2 Origem do betão auto-compactável

O aparecimento e desenvolvimento do BAC surgiu no Japão em 1988 para responder às, cada vez mais, exigentes características de aplicação da betonagem no início daquela década. Situado numa

² Na terminologia dos BAC o termo “finos” refere-se aos ligantes (cimento+adição).

zona de fortíssima probabilidade sísmica, conhecida por anel de fogo, no Oceano Pacífico, o Japão, é um dos pontos mais instáveis da crosta terrestre surgindo com frequência sísmos de elevada magnitude implicando estas preocupações acrescidas nas construções ao nível da sua estabilidade estrutural. Por este facto considera-se na elaboração de projectos, um acréscimo da taxa mínima de armadura, ou seja, a área de secção de aço que as diferentes peças a betonar devem ter de modo a garantir segurança estrutural. Este aumento de secção cria, nas diferentes ligações estruturais, por exemplo, pilar-viga, zonas de dificuldade acrescida à passagem do betão convencional e posterior vibração. Adicionalmente, verificou-se um decréscimo na qualidade na construção devido à gradual redução de mão-de-obra qualificada verificada naquele país. Tentou-se colmatar estes problemas concebendo um betão que se auto compactasse por acção do próprio peso. Em 1986 o professor Okamura e seus colaboradores da Universidade Tecnológica de Kochi desenvolveram um protótipo de BAC visando satisfazer os problemas que se emergiram naquela data [1].

2.3 Métodos e trabalhos desenvolvidos

Desde o aparecimento do BAC muitos autores e organizações têm contribuído para o desenvolvimento desta tecnologia de betões nomeadamente, no estudo de composições de BACs de forma a atingir uma optimização da sua performance e resultados económicos. Destaca-se pela sua simplicidade e uso generalizado os seguintes métodos [2]:

- Okamura et al [1];
- Japan Society of Civil Engineers [6];
- Swedish Cement and concrete Research Institute [7].

Em Portugal estes desenvolvimentos não foram excepção contando com trabalhos publicados por diversos autores ([4] [2] [8] [9] [10] [11] [12])

2.4 Catalisador exausto FCC como adição ao cimento

Como já foi referido anteriormente no subcapítulo 2.1, um dos constituintes do BAC são as adições. Estas podem ser do tipo I (adições quase inertes, por exemplo, o filler calcário) ou do tipo II (adições com propriedades pozolânicas, onde está inserida a adição de catalisador exausto). Para além de substituírem parcialmente o cimento na composição do BAC, as adições conferem um efeito benéfico a algumas propriedades do betão:

- Maior resistência mecânica;
- Maior resistência à segregação do betão;
- Menos densidade;
- Melhor trabalhabilidade.

2.4.1 Importância do uso de adições

A preocupação ambiental em torno das emissões de gases com efeito de estufa, isto é, gases que contribuem nocivamente para o ambiente ao provocarem aumentos de temperatura, levou a que estabeleceu-se em 1997 um acordo entre vários países comprometendo-se em inverter a tendência verificada relativamente a estas emissões, denominado por Protocolo de Quioto [13] [14].

Sendo a indústria cimentícia a principal causa de emissão de gases, nomeadamente responsável por 30% das emissões CO₂, na sociedade civil à escala mundial [15] mas também pelo consumo expressivo de recursos naturais não renováveis como o calcário, as argilas, a energia combustível e eléctrica [16], faz com que o sector da construção seja um dos principais visados a enquadrar a sua actividade no âmbito do acordo do Protocolo de Quioto.

Desta forma, a substituição de cimento, na elaboração de betões, argamassas ou caldas, por adições ao cimento, reduz a necessidade de produção de clínquer, obtendo-se assim uma mitigação dos impactes ambientais que lhe são inerentes e convergindo também deste modo para uma política ambiental mais responsável de acordo com o demarcado pelo Protocolo. (*ver subcapítulo seguinte onde é referido outra mitigação de impacte ambiental*).

2.4.2 Obtenção e características do catalisador

Entende-se por catalisador petroquímico FCC como unidades de “craqueamento” utilizadas na indústria petroquímica para a divisão de hidrocarbonetos complexos em moléculas mais simples e

mais leves, indispensáveis para a obtenção de produtos combustíveis como são, por exemplo, o gasóleo ou o GPL [17].

O catalisador exausto é obtido no processo industrial aquando da cisão dos hidrocarbonetos. Nesta cisão é produzido coques³ que se depositam na superfície do catalisador diminuindo assim a sua eficiência levando à necessidade de renovação do catalisador usado por catalisador fresco [18]. O produto que se remove neste processo é então o catalisador exausto que se usou para a elaboração dos BACs no laboratório.

O catalisador exausto FCC conta na sua composição química com um grande teor de aluminossilicatos o que torna este material como uma óptima adição ao cimento, uma vez que este se apresenta com características pozolânicas (Adição do Tipo II – Pozolânico – subproduto) [19] [17]. Por se tratar dum subproduto industrial, a reutilização do catalisador reforça o subcapítulo anterior, 2.4.1, pois deste modo mitiga-se impactes ambientais por não ser necessário efectuar qualquer tipo de tratamento ao catalisador exausto.

2.5 Propriedades do BAC

Nos BAC tem que se garantir uma alta deformabilidade do betão e resistência à segregação entre a brita e a argamassa aquando da passagem deste pelas zonas de confinamento das barras estruturais [1].

A colisão existente entre os inertes aumenta com a diminuição da distância entre partículas causando desta forma um aumento da tensão interna particularmente na passagem de obstáculos. A energia necessária para o escoamento do betão é consumida pelas elevadas tensões internas, resultando no bloqueio dos inertes constituintes. Limitando a concentração de brita na composição (*como mostra a Figura 2.1*), cujo consumo de energia é particularmente elevado pode-se, eficazmente, evitar este tipo de bloqueio. Esta capacidade intrínseca de deformabilidade consegue-se através do uso de superplastificante, mantendo assim a relação água/finos (V_w/V_p) baixa (*ver abaixo Figura 2.2*).

³ Compostos poliaromáticos insaturados

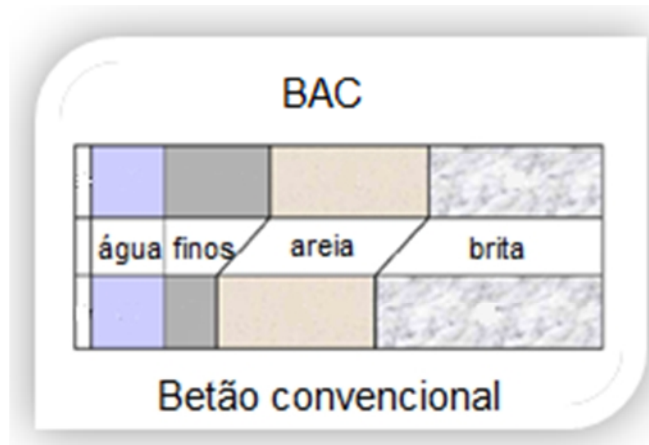


Figura 2.1 - Comparação da mistura entre um BAC e um betão convencional, adaptado de [1]

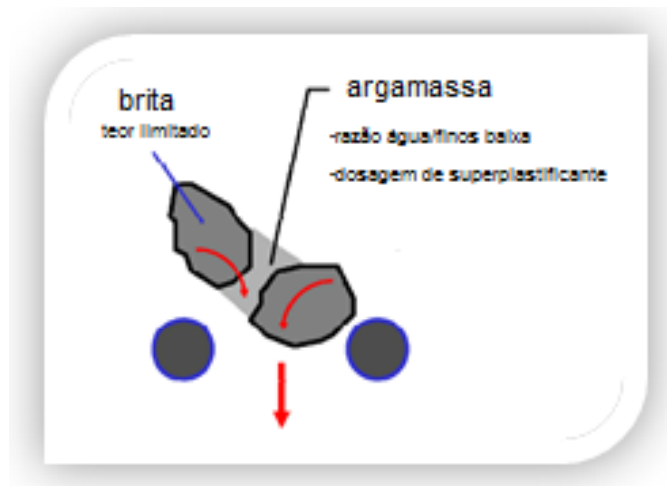


Figura 2.2 - Mecanismo de obtenção de auto-compactabilidade, adaptado de [1]

2.5.1 Auto-compactabilidade no estado fresco

2.5.1.1 Reologia

Entende-se por reologia de uma argamassa ou betão o estudo do seu fluxo e comportamento, no estado fresco, ou seja, a caracterização e análise da sua viscosidade, escoamento, elasticidade e plasticidade. Um betão pode ser visto, neste âmbito, como uma suspensão das suas partículas sólidas, os inertes, num líquido viscoso, ou seja, a sua pasta ligante, e admitindo o comportamento do betão como um fluido podemos aplicar os modelos clássicos da reologia, por exemplo o modelo de Bingham. [2]

2.5.1.2 Trabalhabilidade

Ao contrário dos betões convencionais, onde se aplicam vibrações externas, com auxílio de vibradores, para a sua adequada compactação, os betões auto-compactáveis devem na betonagem (processo de colocação do betão na obra), só por si, isto é, apenas por acção do seu peso próprio, preencher todos os espaços de uma cofragem. A capacidade de enchimento, a resistência à segregação e a capacidade de passagem são requisitos que reflectem as propriedades reológicas do material mas também dependem das condições específicas “in situ” tais como a taxa de armadura (área de armadura nas peças a betonar), distância entre armaduras ou dimensões da cofragem [20] [21], ou seja, está subjacente à trabalhabilidade um carácter subjectivo uma vez que o BAC se pode apresentar trabalhável numas situações e menos trabalhável noutras [2].

2.5.1.2.1 Capacidade de enchimento

Exige-se a um betão auto-compactável uma grande capacidade de enchimento aquando da descarga nas cofragens. Associado a esta propriedade está a capacidade de deformação, ou seja, quanto pode o BAC fluir após ter sido feita a descarga, e a velocidade de deformação, isto é, a velocidade a que este se deforma [20]. Deverá existir um balanço adequado entre a capacidade de deformação e a velocidade a que o BAC se deforma, de modo a atingir uma boa capacidade de enchimento, para tal deve existir um baixo atrito entre as partículas e uma pasta com grande deformabilidade [20].

Assim, deverão ser tomadas as seguintes acções de forma a se alcançar uma adequada capacidade de enchimento [12] [20]:

- Assegurar a deformabilidade da pasta:
 - Recorrendo a adjuvantes nos quais são particularmente eficientes os superplastificantes;
 - Adequada razão água/finos (V_w/V_p).
- Reduzir o atrito entre partículas:
 - Baixo volume de agregados grossos, em relação ao betão convencional, ou seja, aumento da quantidade de pasta;
 - Optimizar a distribuição de finos relativamente aos agregados.

2.5.1.2.2 Resistência à segregação

A propriedade de resistência à segregação caracteriza-se pela heterogeneidade da distribuição dos materiais constituintes [20], ou seja, pela resistência em que as partículas do agregado grosso têm em permanecer dispersas na matriz de argamassa em todas as direções, aquando do escoamento horizontal do BAC e em diferentes níveis de altura [22] [23].

Num BAC com boa resistência à segregação não se devem verificar os seguintes tipos de segregação [20]:

- Exsudação da água;
- Segregação da pasta ou do agregado;
- Segregação do agregado grosso que conduza ao bloqueio;
- Não uniformidade da distribuição dos poros de ar.

No caso de ocorrência de segregação deve-se tomar as seguintes medidas para aumentar a resistência à segregação [20] [23]:

- Reduzir a segregação dos sólidos:
 - Limitar a quantidade de agregados;
 - Reduzir a dimensão máxima dos agregados;
 - Baixar a razão água finos (V_w/V_p);
 - Usar agente indutor de aumento de viscosidade.
- Minimizar a exsudação água livre:
 - Baixar a dosagem de água;
 - Baixar a razão V_w/V_p ;
 - Usar materiais finos com elevada superfície específica;
 - Usar agente indutor de aumento de viscosidade.

2.5.1.2.3 Capacidade de passagem

Esta propriedade traduz a capacidade do betão fluir livremente dentro de uma cofragem através das armaduras ou por aberturas mais estreitas nas cofragens [12]. Com o aumento de armadura nas secções aumenta o risco de ocorrer o efeito de arco (*ver Figura 2.3*), ou seja, pontes de

agregado entre os varões aço, para este efeito também pode contribuir a máxima dimensão e quantidade excessiva do agregado grosso. [24] [25] [26].

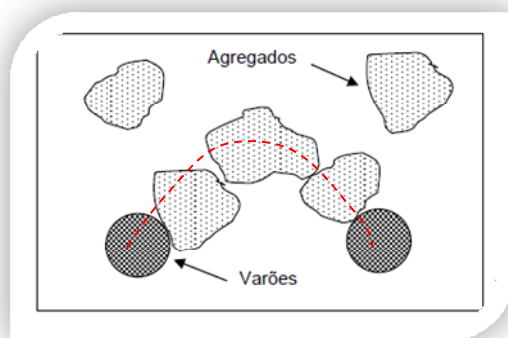


Figura 2.3 – Mecanismo de bloqueio pela formação de pontes, adaptado de [2]

Para ajustar a fluidez deve-se tomar as seguintes medidas:

- Melhorar a coesão para reduzir a segregação dos agregados [2] [12]:
 - Baixar a razão água/finos (V_w/V_p);
 - Usar agente indutor de aumento de viscosidade.
- Compatibilizar as características das aberturas e dos agregados grossos:
 - Baixar o volume dos agregados grossos;
 - Baixar a máxima dimensão dos agregados.

2.6 Método utilizado para a composição de BAC

A metodologia usada no laboratório está assente nos estudos do *Okamura et al* [1] e o da *JSCE*, com algumas alterações propostas pelo Miguel Nepomuceno [2]. Estas propostas para a composição de BACs de Miguel Nepomuceno introduzem: um novo parâmetro designado por “número de mistura” (ver subcapítulo 2.6.2.1); um intervalo de valores para os parâmetros reológicos (ver subcapítulo 2.6.1.2), em vez de se trabalhar com um único valor, entre outros [27]. Esta proposta de Miguel Nepomuceno está dividida, em geral, em duas fases. A primeira visa

estabelecer uma alteração concertada dos parâmetros reológicos das argamassas conducentes ao intervalo de valores, a segunda consiste na transposição, para o betão, da reologia obtida na fase anterior com introdução do parâmetro “número de mistura”, que relaciona o volume de argamassa com o agregado grosso. Apresenta-se nos subcapítulos seguintes, de forma detalhada, cada uma destas fases.

2.6.1 Primeira fase

2.6.1.1 Cálculo da composição da argamassa

Para cada uma das composições de argamassa, ou seja, mistura de finos, manteve-se constante a razão finos/areia (V_p/V_s) = 0.80, embora Miguel Nepomuceno admita valores entre os 0.60 e 0.80, fazendo apenas variar as relações, dos parâmetros de composição, V_w/V_p e $Sp/p\%$. Assim, sabendo antecipadamente as características dos constituintes, nomeadamente as massas volúmicas e absorção nas areias, determinou-se pela ordem apresentada os seguintes valores:

- Valor médio da massa volúmica dos finos (Kg/m^3);

$$\delta_p = f_c \cdot \delta_c + f_a \cdot \delta_a \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Sendo:

- f_c – percentagem de cimento na mistura de finos (%);
- f_a – percentagem de adição na mistura de finos (%);
- c – massa volúmica do cimento (Kg/m^3);
- a – massa volúmica da adição (Kg/m^3).

- Valor da razão entre as quantidades de superplastificante e materiais finos;

$$\frac{V_{sp}}{V_p} = \left(\frac{Sp}{p_{\%}} \right) \cdot \left(\frac{1}{100} \right) \cdot \left(\frac{\delta_p}{\delta_{sp}} \right) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Sendo:

- $Sp/p\%$ - razão percentual, em massa, entre as quantidades totais de superplastificante e materiais finos da mistura;

- sp - massa volúmica do superplastificante (Kg/m^3).
 - p - valor médio da massa volúmica dos finos (Kg/m^3).
-
- Volume absoluto dos materiais finos (m^3/m^3);

$$V_p = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) + \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right)} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Sendo:

- V_w/V_p - razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais de água e dos materiais finos da mistura;
 - V_p/V_s - razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais dos materiais finos e dos agregados finos da mistura.
 - V_{sp}/V_p - razão entre as quantidades de superplastificante e materiais finos
-
- Volume de água (m^3/m^3);

$$V_w = \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \cdot V_p \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Sendo:

- V_w/V_p - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais de água e dos materiais finos da mistura;
 - V_p - Volume absoluto de materiais finos (m^3/m^3).
-
- Volume de superplastificante (m^3/m^3);

$$V_{sp} = \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) \cdot V_p \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Sendo:

- V_{sp}/V_p - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades de superplastificante e de materiais finos da mistura;

○ V_p – Volume absoluto de materiais finos (m^3/m^3).

- Volume absoluto dos agregados finos (m^3/m^3);

$$V_s = \left(\frac{V_p}{\frac{V_p}{V_s}} \right) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Sendo:

- V_p – Volume absoluto de materiais finos (m^3/m^3);
- V_p/V_s - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais dos materiais finos e dos agregados finos da mistura.

2.6.1.2 Ensaios conducentes aos parâmetros reológicos pretendidos

Para obtenção duma reologia que satisfizesse as características exigidas ao BAC, Okamura et al [1] fizeram-se recorrer de ensaios de espalhamento e fluidez⁴ de modo a obterem os parâmetros reológicos G_m e R_m respectivamente. Após vários ensaios concluíram que os valores que optimizavam o desempenho do BAC estudados foram para a área de espalhamento relativa $G_m=5$ e para a velocidade relativa de escoamento $R_m=1$ [1]. Porém estes valores vieram sendo alvo de modificações, com estudos posteriores, nomeadamente investigadores no Japão, passando a ser adoptados valores de intervalo admissíveis. Miguel Nepomuceno [2] considerou um intervalo mais restrito e conservador, relativamente aos investigadores, garantindo assim deste modo melhores performances no betão (consultar abaixo a Figura 2.4, onde se encontra os intervalos de valor que foram referidos). Assim considere-se para este trabalho as seguintes relações (*ver ensaios correspondentes nos subcapítulos 3.5.3.1 e 3.5.3.2*):

$$5.3 \leq G_m \leq 5.9 \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$1.14 \leq R_m \leq 1.30 \quad (\text{Eq. 2.8})$$

⁴ Na terminologia dos BACs o ensaio de fluidez refere-se ao ensaio efectuado no funil V. Ver subcapítulo **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

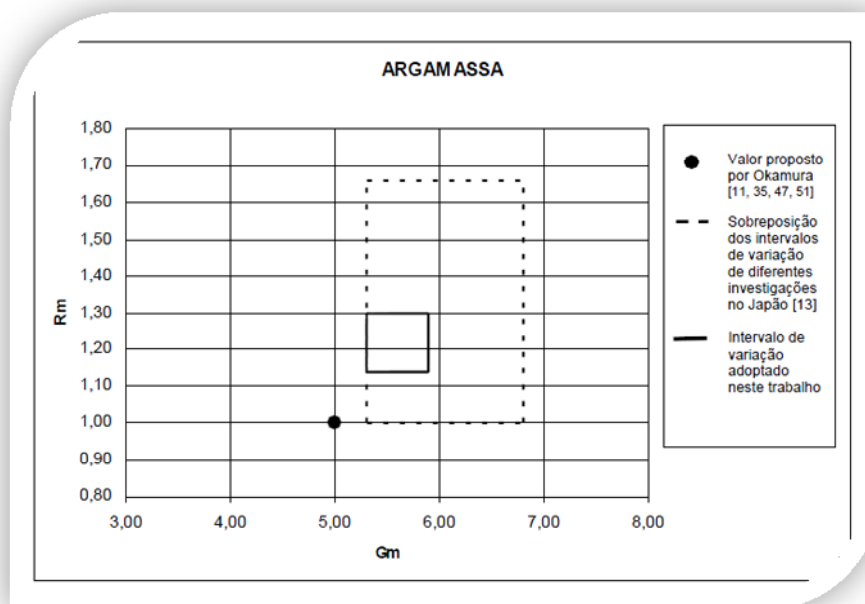


Figura 2.4 – Intervalo de variação dos parâmetros reológicos adoptados, extraído de [2]

2.6.1.3 Metodologia para os acertos da reologia

Como referido no subcapítulo 2.6.1.1, os parâmetros da composição sujeitos a alteração concertada para o ajuste reológico pretendido são o $Sp/p\%$ e o Vw/Vp . Assumindo o padrão de comportamento verificado por Ouchi et al [1], constata-se uma regressão linear, com origem no referencial, para valores constantes de $Sp/p\%$, com decréscimo do seu declive face ao aumento de concentração do superplastificante na mistura, e uma variação assintótica também com origem no referencial, para os valores da razão água/finos (Vw/Vp), que aumenta o seu limite assintótico com o aumento da concentração de água na amassadura

Sempre que os valores obtidos nos ensaios não se enquadravam no “alvo adoptado” ((Eq. 2.7) e (Eq. 2.8)) para o trabalho, ajustava-se, através de sucessivas iterações, os parâmetros reológicos, $Sp/p\%$ e o Vw/Vp , até à reologia pretendida com o auxílio da figura abaixo [2].

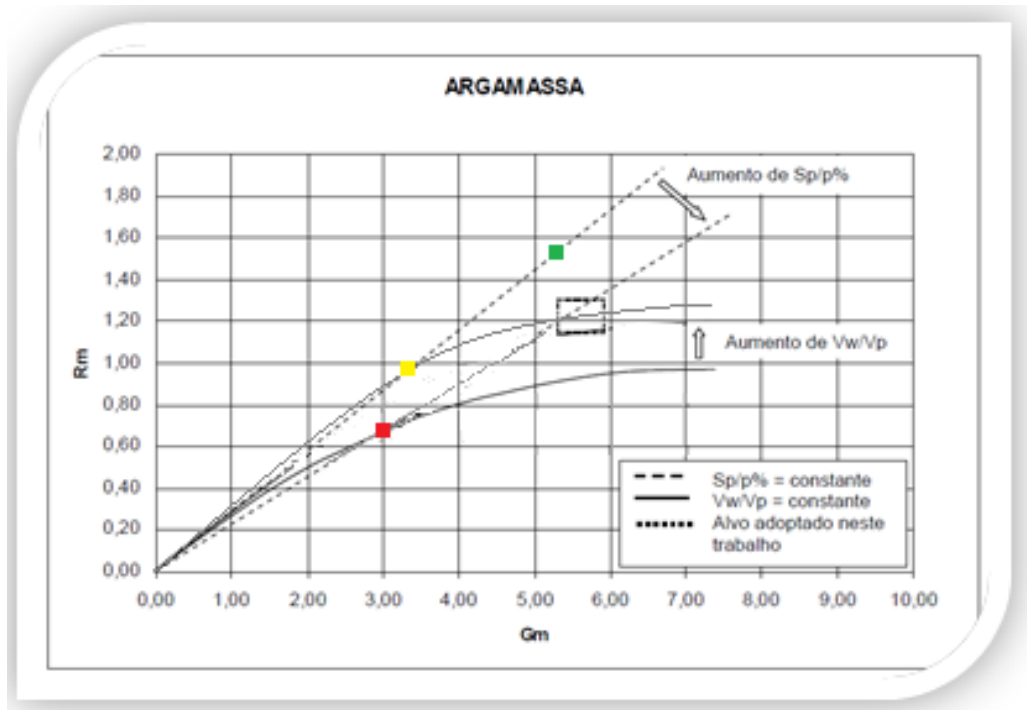


Figura 2.5 – Ajustamento reológico das amassaduras, alteração concertada dos parâmetros reológicos (V_w/V_p e $S_p/p\%$). Três casos possíveis, adaptado de [2]

Os três pontos assinalados acima correspondem às três situações possíveis de ocorrer:

- 1) Ponto vermelho – ponto coordenado sobre uma recta do parâmetro $S_p/p\%$ que intersecta o alvo adoptado, ou seja, na amassadura seguinte só é necessário ajustar o parâmetro V_w/V_p (no caso representado ter-se-ia de o aumentar);
- 2) Ponto amarelo – ponto coordenado sobre uma assíptota do parâmetro V_w/V_p que intersecta o alvo adoptado, ou seja, na amassadura seguinte só é necessário ajustar o parâmetro $S_p/p\%$ (no caso representado ter-se-ia de o aumentar);
- 3) Ponto verde – ponto situado fora de qualquer recta ou assíptota que intersecta o alvo adoptado. Está-se perante a situação onde é necessário alterar ambos os parâmetros na amassadura seguinte (de acordo com o que está representado na figura acima ter-se-ia de aumentar o valor de $S_p/p\%$ e diminuir o valor do parâmetro V_w/V_p).

2.6.2 Segunda fase

2.6.2.1 Cálculo da composição do betão

Uma vez determinados os parâmetros da composição, para cada composição de finos, inicia-se a presente fase. Semelhantemente ao cálculo realizado nas argamassas apresentam-se as expressões para a determinação das dosagens a usar em cada uma das amassaduras. Porém, neste cálculo devido à introdução dos agregados grossos e por o volume de amassadura ser significativamente maior, são introduzidos dois novos parâmetros:

1. Volume de vazios (V_v) na mistura, que o Miguel Nepomuceno assume constante igual a $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e que se vai assumir neste trabalho;
2. Número Mistura (MN), (Eq. 2.9), necessário para a determinação da dosagem do agregado grosso, pretende traduzir um número de mistura associado à combinação dos dois parâmetros.

$$MN = \left(\frac{V_p}{V_s}\right) \cdot \left(\frac{V_m}{V_g}\right) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Sendo:

- V_p/V_s - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais dos materiais finos e dos agregados finos da mistura;
- V_m/V_g - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades de argamassa e agregado grosso da mistura.

Para a escolha dum MN que melhor se ajustasse às características do BAC, o Miguel Nepomuceno [2] relaciona o MN com os resultados obtidos no ensaio da caixa L (H_2/H_1), em que H_2 e H_1 são a altura do BAC no final e início do aparelho respectivamente (*para compreender melhor este ensaio ver subcapítulo 3.6.3.3*). A Figura 2.6 mostra que para a obtenção dum BAC (área a amarelo) devem ser excluídos as amassaduras que apresentem um $H_2/H_1 < 0.80$ [3]. Por se apresentar muito próximo do limite que garante a auto-compactabilidade do BAC, mesmo para valores do ensaio de espalhamento (DM) entre os 630 e 670 mm (*ver ensaio de espalhamento no subcapítulo 3.6.3.1*) a escolha de valores MN muito próximos de 1.70 poderiam apresentar um risco face à obtenção dum BAC, assim o valor recomendado [2] e adoptado para o cálculo dos constituintes foi $MN=1,82$.

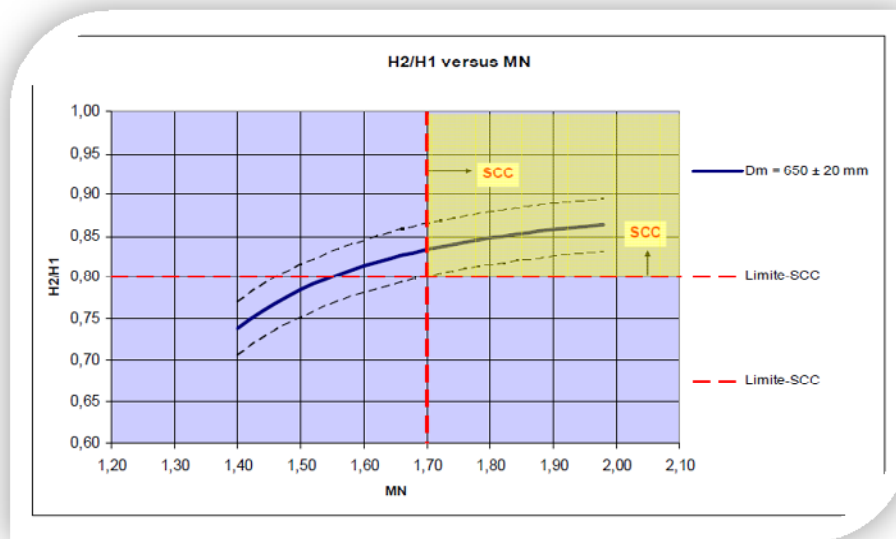


Figura 2.6 – Relação entre MN e $H2/H1$ quando Dm varia entre os 630 e 670 mm, extraído de [2]

Assim para o cálculo das dosagens utilizou-se as seguintes equações:

- Valor médio da massa volúmica dos finos (Kg/m^3), como determinado na equação (Eq. 2.1);
- Valor da razão (V_{sp}/V_p), como determinado na equação (Eq. 2.2);
- Volume absoluto dos agregados grosso (m^3/m^3);

$$V_g = \frac{1 - V_v}{1 + \left(\frac{V_m}{V_g}\right)} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Sendo:

- V_v - Volume de vazios na mistura (m^3/m^3);
- V_m/V_g - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades de argamassa e agregado grosso da mistura.

- Volume absoluto da argamassa na mistura (m^3/m^3);

$$Vm = \frac{Vm}{Vg} \cdot Vg \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Sendo:

- Vm/Vg - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades de argamassa e agregado grosso da mistura;
- Vg - Volume absoluto dos agregados grosso (m^3/m^3).

- Volume absoluto dos materiais finos (m^3/m^3);

$$Vp = \frac{1}{1 + \left(\frac{Vw}{Vp}\right) + \frac{1}{\left(\frac{Vp}{Vs}\right)} + \left(\frac{Vsp}{Vp}\right)} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Sendo:

- Vw/Vp - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais de água e dos materiais finos da mistura;
- Vp/Vs - razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais dos materiais finos e dos agregados finos da mistura.
- Vsp/Vp - razão entre as quantidades de superplastificante e materiais finos

- Volume de água (m^3/m^3);

$$Vw = \left(\frac{Vw}{Vp}\right) \cdot Vp \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Sendo:

- Vw/Vp - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais de água e dos materiais finos da mistura;
- Vp - Volume absoluto de materiais finos (m^3/m^3).

- Volume de superplastificante (m^3/m^3);

$$V_{sp} = \left(\frac{V_{sp}}{V_p} \right) \cdot V_p \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Sendo:

- V_{sp}/V_p - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades de superplastificante e de materiais finos da mistura;
 - V_p – Volume absoluto de materiais finos (m^3/m^3).
- Volume absoluto dos agregados finos (m^3/m^3);

$$V_s = \left(\frac{V_p}{V_s} \right) \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Sendo:

- V_p – Volume absoluto de materiais finos (m^3/m^3);
- V_p/V_s - Razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais dos materiais finos e dos agregados finos da mistura.

2.7 Classificação do BAC

De forma a poder-se realizar uma escolha criteriosa dos BACs para uma aplicação específica, é possível enquadrar os BACs preparados, em classes de consistência, segundo as suas propriedades no estado fresco,

2.7.1 Classes de consistência

A Norma europeia NP EN 206-9 [3], apresenta no seu documento as seguintes classes de consistência, Quadro 2.1, a aplicar a betões auto-compactáveis, referindo ainda o seguinte apontamento que transcrevo:

(Nota: É normal especificar apenas a classe de espalhamento. Nalgumas situações é também necessário especificar, como ensaios iniciais, uma classe da Caixa L e/ou uma classe de resistência à segregação e/ou o valor T500 ou uma classe do ensaio de Funil V)

Quadro 2.1 - Classes de consistência dos BACs, extraído de [27]

Característica	Ensaio	Class e	Parâmetros	Análise qualitativa	Notas
Espalhamento	Espalhamento [mm] EN 12350-8	SF1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com pouca armadura (ex. lajes ou pavimentos); betão bombeado (ex. revestimento de túneis); secções suficientemente pequenas para prevenir escoamentos horizontais (ex. pilares e fundações profundas)	Não aplicável a betões $c/D_{max} > 40$ mm
		SF2	660 a 750	Aplicações correntes (ex. paredes, pilares)	
		SF3	760 a 850	Aplicações verticais, estruturas densamente armadas e/com formas complexas; melhor superfície de acabamento mas mais difícil de controlar a segregação; geralmente $c/D_{max} \leq 16$ mm	
Viscosidade	Espalhamento T ₅₀₀ [s] EN 12350-8	VS1	≤ 2	Boa capacidade de preenchimento; capacidade de auto-nivelamento e melhor grau de acabamento; maior risco de exsudação ou segregação.	Não aplicável a betões $c/D_{max} > 22,4$ mm
		VS2	3 a 6	Semelhante ao VF2	
		VS3	> 6	Casos especiais	
	Funil V [s] EN 12350-9	VF1	< 9	Boa capacidade de preenchimento; capacidade de auto-nivelamento e melhor grau de acabamento; maior risco de exsudação ou segregação.	
		VF2	9 a 25	Com o crescimento do tempo de espalhamento, existe maior probabilidade de ter efeitos tixotrópicos, que podem ajudar a limitar a pressão na cofragem ou a aumentar a resistência à segregação. Pode apresentar dificuldades com o acabamento superficial (chochos), com o enchimento de cantos com betão SF1 e a maior sensibilidade às paragens ou atrasos entre camadas sucessivas.	
Capacidade de passagem	Caixa L EN 12350-10	PL1	≥ 0.80 c/2 varões	PL1 ou PJ1 – estruturas com intervalos de 80 a 100 mm (ex. edificios, estruturas verticais); PL2 ou PJ2 – estruturas com intervalos de 60 a 80 mm (ex. estruturas correntes de engenharia civil); em lajes delgadas com intervalo > 80 mm e estruturas com o intervalo > 100 mm, não é requerida a especificação da capacidade de passagem. Para intervalos < 60 mm podem ser necessários ensaios prévios em modelos.	Não aplicável a betões $c/D_{max} > 40$ mm
		PL2	≥ 0.80 c/3 varões		
	Anel J [mm] EN 12350-12	PJ1	≤ 10 c/12 varões		
		PJ2	≤ 10 c/16 varões		

2.8 Vantagens do BAC

Considerado como um dos maiores avanços tecnológicos nas últimas décadas nesta temática, pode-se afirmar que o BAC tem como principais vantagens [28]:

- Velocidade de construção elevada;
- Redução de mão-de-obra;
- Melhores acabamento de superfícies;
- Maior facilidade de aplicação;
- Durabilidade acrescida;
- Maior liberdade de arquitectura;
- Secções de betão inferiores;
- Reduções do nível de barulho e ausência de vibrações;
- Melhores condições de segurança no trabalho.

2.9 Desvantagens do BAC

A utilização na sua composição de uma grande percentagem de material fino conduz forçosamente a estas desvantagens:

- Maiores custos económicos iniciais comparativamente ao betão convencional, embora haja uma melhor relação custo/benefício, devido às vantagens anunciadas, com o evoluir da obra;
- Maior susceptibilidade aos fenómenos de fluência e retracção [2];
- Maior controlo na sua produção;
- Utilização de cofragens mais estanques;
- Maior calor de hidratação.

2.10 Casos de aplicação do BAC

Contando com inúmeras aplicações em todo mundo, o BAC teve ao longo das últimas décadas aplicações em edifícios, pontes, tanques, muros de contenção, tuneis bem como obras arquitectónicas de relevância [29]. Destacam-se pela sua importância construtiva os seguintes casos:

Quadro 2.2 – Caso de aplicação do BAC – Ponte Akaishi-Kaiko

Akaishi-Kaiko

Local: Japão

Tipologia: Ponte

Ano de conclusão: 1998

Observações:

- Aproximadamente 290m³ empregue nas duas ancoragens;
- Redução do período de execução de cerca de 20%, ou seja, de 2,5 para 2 anos, devido à utilização do BAC [12] [31].



Figura 2.7 – Ponte Akaishi-Kaiko, retirado de [30]

Quadro 2.3 – Caso de aplicação do BAC – Tanque de GNL

Tanque de GNL⁵

Local: Japão

Tipologia: Tanque

Ano de conclusão: 1998

Observações:

- Despendidos 12.000m³ de BAC;
- Redução da mão-de-obra de 150 para 50 trabalhadores e do período de construção de 22 para 18 meses, devido à utilização do BAC [33].



Figura 2.8 – Tanque de GNL, retirado de [32]

⁵ GNL - Gás Natural Liquefeito

Quadro 2.4 – Caso de aplicação do BAC – Edifício Burj Dubai**Burj Dubai [29] [34]**

Local: Dubai

Tipologia: Edifício

Ano de conclusão:2009

Observações:

- Construção mais alta do mundo.



Figura 2.9 – Torre Burj Dubai, retirado de [35]

Quadro 2.5 – Caso de aplicação do BAC – Torre do aeroporto de Arlanda**Torre de controlo do aeroporto de Arlanda [29]**

Local: Suécia

Tipologia: Torre

Ano de conclusão:2001

Observações:

- 83 metros de altura representando um dos símbolos da cidade de Estocolmo;
- BAC usado para aumentar a rapidez construtiva (3,27m em 4dias).



Figura 2.10 – Torre de controlo do aeroporto de Arlanda, retirado de [36]

Quadro 2.6 – Caso de aplicação do BAC – MAXXI Museo

MAXXI Museo [29]

Local: Itália

Tipologia: Edifício

Ano de conclusão: 2008

Observações:

- Área ocupada de 30.000m².



Figura 2.11 – MAXXI Museo, retirado de [37]

No nosso país destacam-se as seguintes obras onde foi aplicado o BAC [12]:

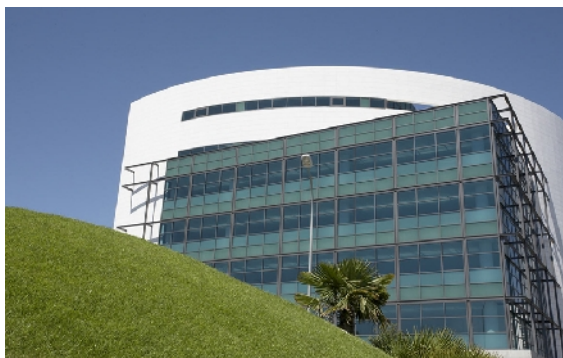


Figura 2.12 – Edifícios Lagoas Park, retirado de [38]



Figura 2.13 – Edifício Expoland, retirado de [39]



Figura 2.14 – Cineteatro Municipal do Cartaxo, retirado de [40]

3 Descrição da campanha laboratorial

3.1 Considerações gerais

Neste capítulo descrevem-se os materiais utilizados e os protocolos dos ensaios realizados na campanha experimental.

Os resumos dos demais processos de concepção e ensaios das argamassas e dos betões serão então abordados, informando ainda que todos eles respeitam as normas previamente estabelecidas.

Conforme referido no capítulo anterior, subcapítulo 2.6, a abordagem laboratorial adoptada nesta dissertação foi dividida, em linhas gerais, em duas partes. A primeira, o estudo e determinação dos parâmetros reológicos das argamassas, R_m e G_m (*ver ensaios nos subcapítulos 3.5.3.1 e 3.5.3.2*), e ensaios de resistência mecânica. O segundo, com os valores obtidos nas argamassas, procedeu-se então aos demais ensaios no estado fresco e endurecido dos provetes de betão preparados no laboratório.

A actividade laboratorial teve lugar no Laboratório de Materiais de Construção sítio no Edifício Ferreira Cardoso no ISEL e no LNEC, estando sempre munido, em cada uma das fases, de todo o equipamento de protecção individual, tais como bata, luvas e calçado apropriado.

Em todas as fases desta campanha, como em todas actividades realizadas num qualquer laboratório, imperou a sistemática verificação das condições de limpeza/higiene bem como dos defeitos de todos os materiais usados no decorrer dos trabalhos.

3.2 Designação e composição das misturas estudadas

O planeamento inicial para este trabalho consistia no estudo de 5 composições binárias (cimento mais catalisador exausto de FCC) com incrementos de 10% de substituição de cimento até atingir a incorporação de 40% de catalisador exausto de FCC. Porém, após a realização das amassaduras (*ver subcapítulo 3.5.2 e Figura 3.1*) verificou-se a ocorrência de exsudação nas composições com 30 e 40% de incorporação do catalisador exausto de FCC. Assim, considerou-se realizar uma

nova composição binária, com 25% de incorporação de catalisador exausto de FCC, para verificação de ocorrência de exsudação. Uma vez não verificada a exsudação prosseguiu-se a campanha experimental considerando esta composição.

O quadro seguinte apresenta as designações dadas as diferentes composições de argamassas e betões

Quadro 3.1 – Designação das argamassas e betões

Designação		Finos (%)	
		Cimento CEM I 42,5R (C)	Catalisador exausto petroquímico (FCC)
Argamassas	A.100C	100	0
	A.90C+10FCC	90	10
	A.80C+20FCC	80	20
	A.70C+30FCC	70	30
	A.60C+40FCC	60	40
	A.75C+25FCC	75	25
Betões	B.100C	100	0
	B.90C+10FCC	90	10
	B.80C+20FCC	80	20
	B.75C+25FCC	75	25

3.3 Esquematização das actividades

Na Figura 3.1 e Figura 3.2 apresentam-se dois esquemas que sumarizam os processos, fluxos de trabalhos e as decisões levadas a cabo nas duas fases da campanha laboratorial, fase de argamassas e betões respectivamente:

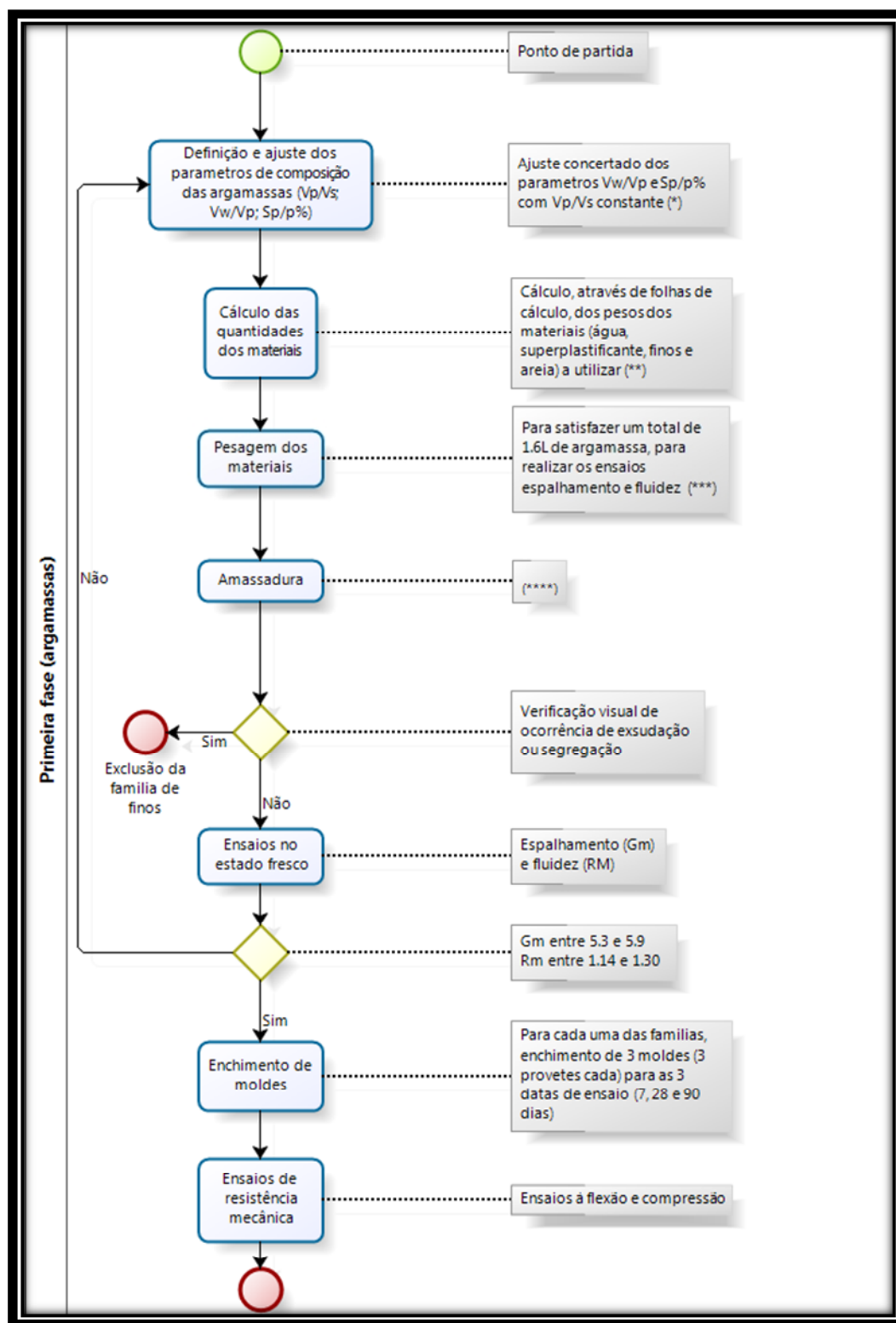


Figura 3.1 – Esquematização da primeira fase: preparação das argamassas

(*) ver subcapítulo 2.6.1.3

(***) ver subcapítulo 3.5.13.5.3

(**) ver subcapítulo 2.6.1.1

(****) ver subcapítulo 3.5.2

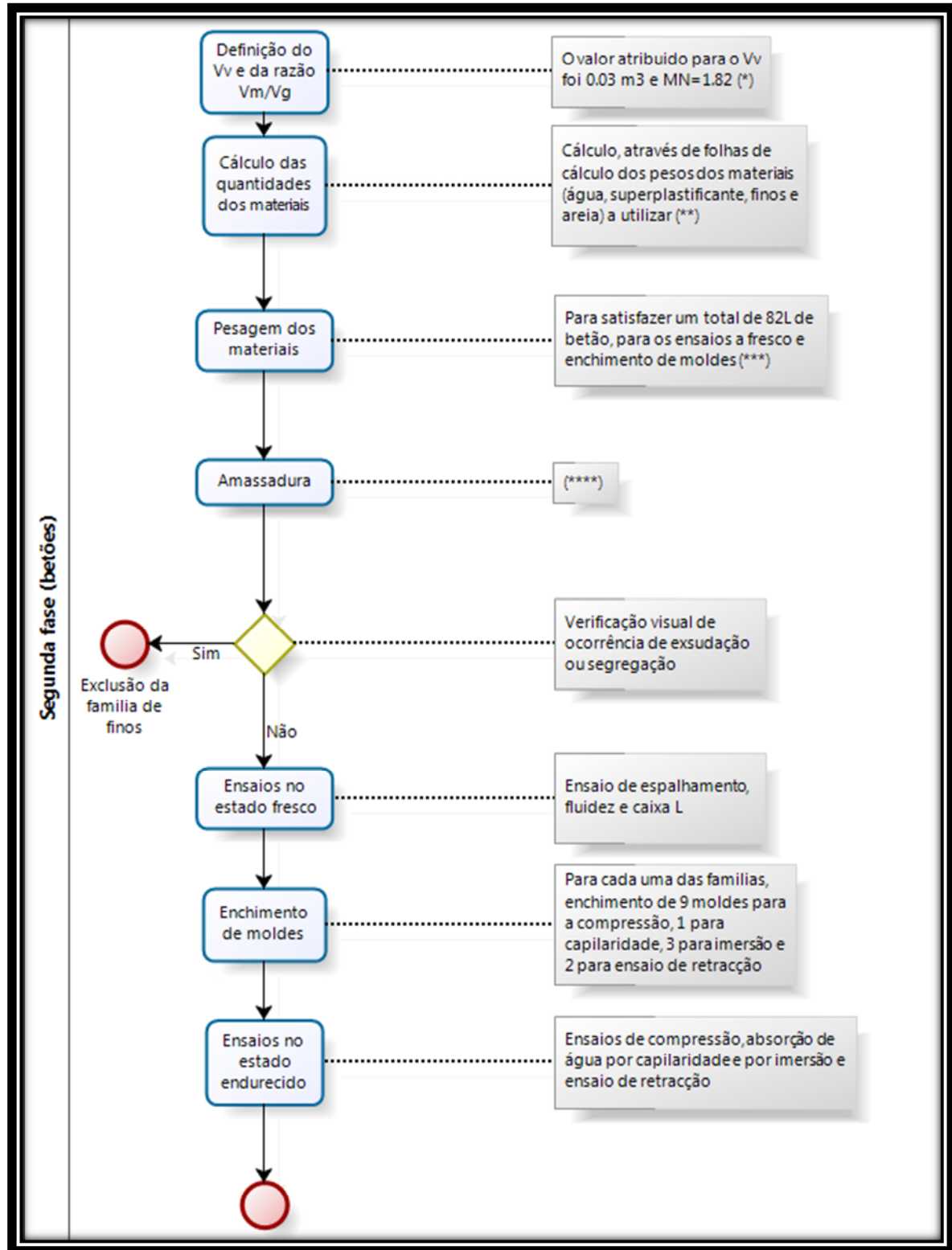


Figura 3.2 – Esquematização da segunda fase: preparação dos betões

(*) ver subcapítulo 2.6.2.1

(***) ver subcapítulo 3.6.13.5.3

(**) ver subcapítulo 2.6.2.1

(****) ver subcapítulo 3.6.2

3.4 Materiais

Os materiais utilizados nesta campanha encontravam-se no laboratório devidamente selados e condicionados em separado para garantir o devido controlo da humidade para não se conduzirem à sua degradação ou alteração das suas propriedades. Apresenta-se no quadro seguinte os materiais constituintes utilizados no laboratório bem como a sua proveniência.

Quadro 3.2 – Constituintes usados e proveniência

Material		Proveniência/marca
Ligantes	Cimento	Cimento Portland tipo I com classe 42,5R da Cimpor da Central de Alhandra (silo 21)
	Adição	Catalisador exausto de FCC com origem da refinaria de Sines da Petrogal
Agregado grosso	Brita 1	Central Unibetão de Ponte de Frielas
	Brita 2	Central Unibritas do Zambujal
Agregado fino	Areia 01	Central Sulinerte de Coina
	Areia 04	Grupo Soarvamil de Vale Milhaços
-	Água	Água corrente da zona de Lisboa
	Adjuvante	Superplastificante SikaPlast 898

3.4.1 Ligantes

3.4.1.1 Cimento

O cimento gasto nas actividades foi o cimento conforme com a NP EN 197-1 [41]. Cimento Portland do tipo I da classe de resistência de 42,5 com elevado desempenho mecânico aos 28 dias (CEM I 42,5R).

A escolha desta classe prendeu-se ao facto deste cimento ser recorrentemente utilizado no sector da construção para além da disponibilidade do mercado apresentado por este produto.

3.4.1.2 Adição

Por causa das propriedades requeridas pelo BAC, as adições, quer as inertes quer as pozolânicas, são frequentemente utilizadas para otimizar o desempenho geral dos betões no estado fresco como a resistência à segregação e também para regular o teor de cimento de modo a reduzir o calor de hidratação e a retracção térmica [42].

O tipo de adições então as seguintes:

Quadro 3.3 – Tipos de adições, adaptado de [42]

Tipo I	Inertes ou semi-inertes	Filler mineral (calcário, dolomite, etc.)
Tipo II	Pozolânicas	Cinzas volantes e sílicas de fumo
	Hidráulicas latentes	Escórias de alto-forno

Conforme o referido no subcapítulo 2.4.2 Pode-se inserir a nossa adição, o catalisador exausto de FCC, no tipo II.

3.4.2 Agregado

Segundo a norma NP EN 206 (2007) - 3.1.24 [43] o agregado é:

“Material mineral granular adequado para utilização no betão. Os agregados podem ser naturais, artificiais ou reciclados de materiais precisamente usados na construção.”

É utilizado para atribuir ao produto final uma maior estabilidade dimensional (diminuição da fluência e retracção), bem como por razões económicas, dado ao elevado valor comercial do cimento. Introduce-se na pasta de cimento (cimento + água) agregados finos (areias) resultando as argamassas e agregados grossos (britas) obtendo-se betão. A sua dosagem deve ser tanto maior quanto a for possível introduzir na pasta de modo a que esta aglomere todas as suas partículas, representando no produto final cerca de 60% de volume do BAC. [1] [44]

As principais propriedades que se exigem aos agregados usados no fabrico de betão são [44]:

- adequada forma e dimensões proporcionadas (granulometria);
- adequada resistência às forças;
- adequadas propriedades térmicas;
- adequadas propriedades químicas relativamente ao ligante e às acções exteriores;
- isenção de substâncias prejudiciais.

3.4.2.1 Agregados finos

São considerados agregados finos as areias cuja máxima dimensão das suas partículas não excedam os 5 mm e compreendidas inferiormente por 0,125 mm, sendo considerado abaixo desta medida como material fino [2].

Para a optimização do comportamento final das argamassas e betões em geral é requerido às areias uma distribuição granulométrica contínua, ou seja, uma distribuição equilibrada entre as areias finas com as mais grossas [2]. Características como o diâmetro médio das partículas, o módulo de finura ou a sua forma influenciam a auto-compactabilidade do betão no estado fresco [2].

No Quadro 3.4 apresenta-se a distribuição granulométrica das areias usadas bem como da mistura entre elas escolhida, de forma a optimizar a diminuição dos volumes de vazios (60% de volume da areia 0/1 e a restante de areia 0/4) (mistura que optimiza a baridade e modulo de finura).

Quadro 3.4 – Distribuição granulométrica das areias 0/1 e 0/4 e da mistura usada, 60 e 40 por cento respectivamente.

Abertura Peneiros (mm)	Areia 0/1	Areia 0/4	Mistura (60/40)
	% de material passado acumulado	% de material passado acumulado	% Passado acumulado
8	100,00%	100,00%	100,00%
6	100,00%	99,75%	99,90%
5	100,00%	98,33%	99,33%
4	100,00%	96,64%	98,65%
2	99,92%	81,76%	92,66%
1	99,52%	42,35%	76,65%
0,5	80,31%	8,33%	51,52%
0,25	16,95%	1,22%	10,65%
0,125	0,23%	0,19%	0,22%
0,063	0,00%	0,00%	0,00%
Módulo de finura	2,03	3,70	2,70

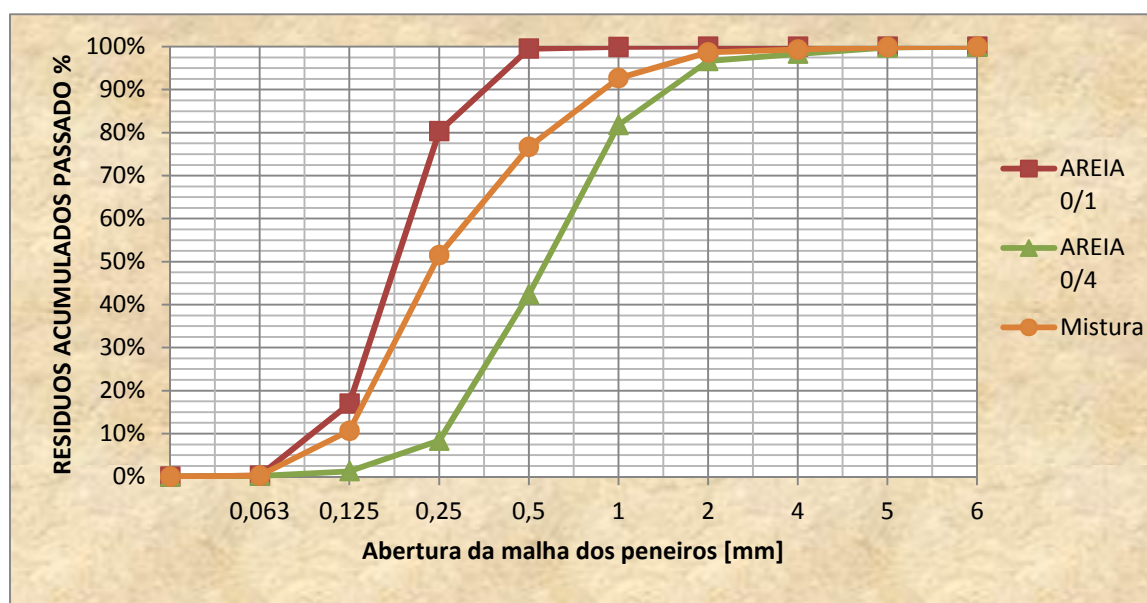


Figura 3.3 - Curva granulométrica das Areias 0/1 e 0/4 e respectiva mistura(60% e 40% de volume respectivamente)

3.4.2.2 Agregado grosso

Com uso exclusivo na preparação das amassaduras de betão, são as partículas inertes de diâmetro superior a 5mm e que não têm um tecto máximo para a sua dimensão máxima embora devido à

aplicação do BAC em estruturas de betão armado seja recomendável uma dimensão não superior a 20mm. [2] [42]

A granulometria e a forma das suas partículas têm influência na fluidez e na capacidade de enchimento do BAC. Quanto mais esféricas forem melhor serão os desempenhos do betão devido à redução de atrito interno [42]

No Quadro 3.5 apresenta-se a granulometria da brita usada foi a que se apresenta a seguir.

Quadro 3.5– Distribuição granulométrica das britas 1 e 2 e da mistura usada, 60 e 40 percento de volume respectivamente

Abertura Peneiros (mm)	Brita 1	Brita 2	Mistura
	% Passado acumulado	% Passado acumulado	% Passado acumulado
63	100,00%	100,00%	100,00%
45	100,00%	100,00%	100,00%
40	100,00%	100,00%	100,00%
31,5	100,00%	100,00%	100,00%
22,4	100,00%	100,00%	100,00%
20	100,00%	100,00%	100,00%
16	100,00%	60,73%	84,29%
14	99,73%	34,67%	73,71%
12	97,37%	18,37%	65,77%
11	90,00%	7,69%	57,08%
10	79,65%	3,29%	49,11%
8	50,27%	0,69%	30,44%
6	18,30%	0,23%	11,07%
5	8,84%	0,15%	5,37%
4	0,81%	0,08%	0,52%
2	0,19%	0,04%	0,13%
1	0,00%	0,00%	0,00%
0,5	0,00%	0,00%	0,00%
0,25	0,00%	0,00%	0,00%
0,125	0,00%	0,00%	0,00%
0,063	0,00%	0,00%	0,00%
Módulo de finura	6,49	7,38	6,85

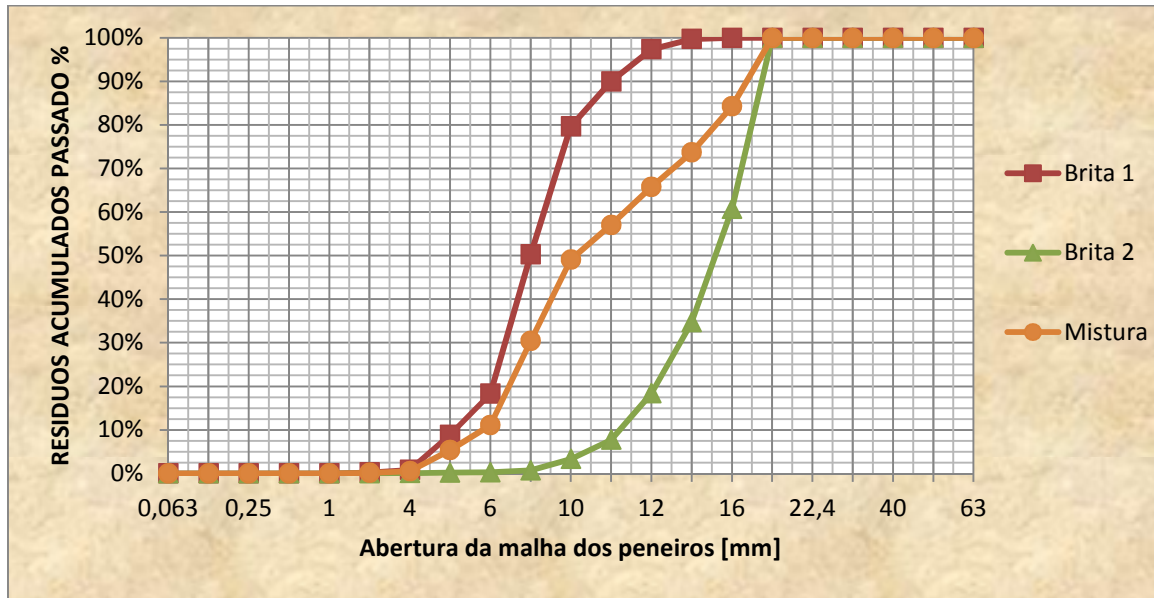


Figura 3.4 – Curva granulométrica das Britas 1 e 2 e respectiva mistura (60% e 40% de volume respectivamente)

3.4.3 Água

Foi utilizada, em toda a fase experimental, água da rede pública da região de Lisboa.

3.4.4 Adjuvante

Na produção de betão foi utilizado adjuvante do tipo superplastificante (reductor de água de amassadura), da SikaPlast 898. Este superplastificante cumpre a norma NP EN 934-2 (*informação dada pelo fornecedor*).

3.5 Argamassas

3.5.1 Preparação e dosagem dos constituintes

Após recolha da informação das dosagem, a usar em cada amassadura, com base no referido no subcapítulo 2.6.1.1, procedeu-se às pesagens utilizando uma balança electrónica de exactidão $\pm 1g$ [45] armazenando os materiais em sacos próprios até serem colocados no recipiente da misturadora.

3.5.2 Amassadura

Depois de se pesar todos os materiais (areia, cimento, catalisador exausto de FCC, água e adjuvante), foram inseridas as respectivas dosagens numa misturadora normalizada (marca: PERTA) [45] para dar início à mistura dos materiais e consequente preparação da argamassa. Na Figura 3.5 apresenta-se a sequência utilizada na mistura foi a seguinte:

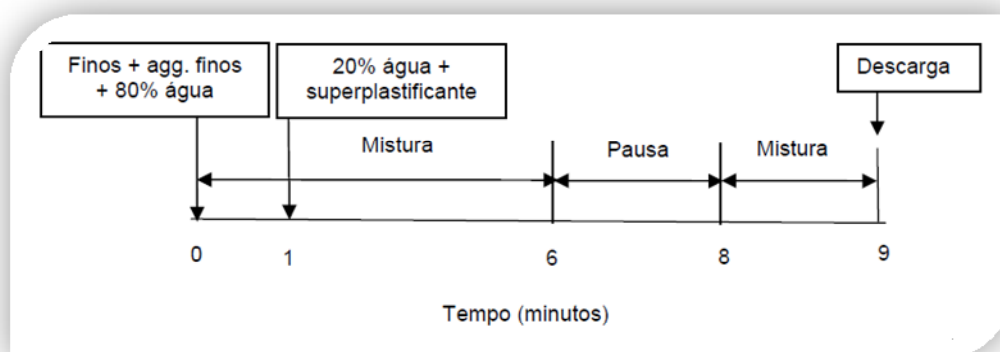


Figura 3.5 – Sequência da amassadura das argamassas, extraído de [2]

As fotografias que se apresentam (Figura 3.6) mostram as diferentes etapas da preparação da amassadura:



Figura 3.6 – Realização da amassadura de argamassa: a) pesagem do catalisador exausto de FCC; b) pesagem do superplastificante; c) introdução à passagem do 1º minuto de amassadura dos 20% de água misturada com superplastificante; d) pausa para limpeza.

3.5.3 Ensaios a fresco

Para averiguar e ajustar os valores de V_w/V_p e $Sp/p\%$ a fim de a argamassa possuir as características reológicas exigidas a um betão auto-compactável (*ver subcapítulo 2.6.1*), foram realizados testes à sua deformabilidade e viscosidade, espalhamento e teste do funil respectivamente.

Na determinação dos parâmetros de composição (V_w/V_p e $S_p/p\%$) das argamassas foi necessário utilizar, em cada amassadura, 1.60L de argamassa, visto ser esta a quantidade necessária para a realização do ensaio de espalhamento e fluidez.

3.5.3.1 Ensaio de espalhamento

A determinação do parâmetro G_m impõe a realização do ensaio de espalhamento através de um molde cónico (indicado na Figura 3.7) retirando-se duas medições, perpendiculares entre si, do diâmetro obtido pela argamassa.

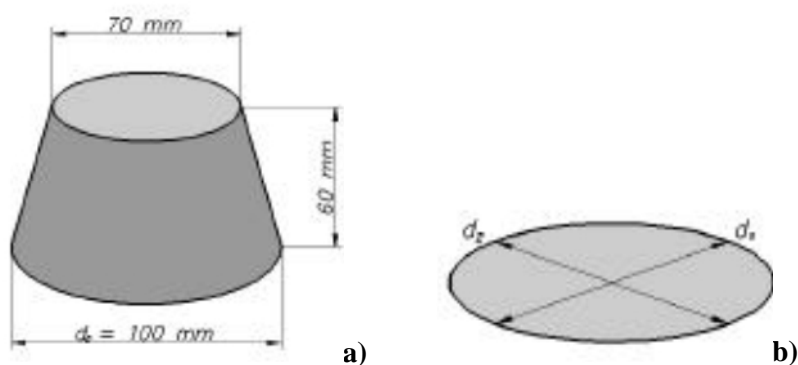


Figura 3.7 – Ensaio de espalhamento das argamassas. a) dimensões do molde de ensaio; b) leituras diamétricas d_1 e d_2 após estabilização da argamassa, extraído de [28]

Para a correcta elaboração do ensaio de espalhamento foi necessário garantir:

- Nivelamento da mesa de ensaio;
- Humedecimento das paredes interiores do cone e mesa de ensaio;
- Enchimento do molde até ao topo e rasá-lo com um objecto com uma superfície regular, por exemplo, um régua metálica;
- Levantar o molde, o mais vertical possível, e esperar que toda a argamassa escorra do molde e caia para a mesa;
- Esperar até que o diâmetro estabilize e realizar as leituras em (mm).

Para melhor elucidar este ensaio apresenta-se as seguintes fotografias, tiradas durante um dos ensaios de espalhamento, (Figura 3.8), em que é visível as diferentes etapas (*ler legenda da figura*):

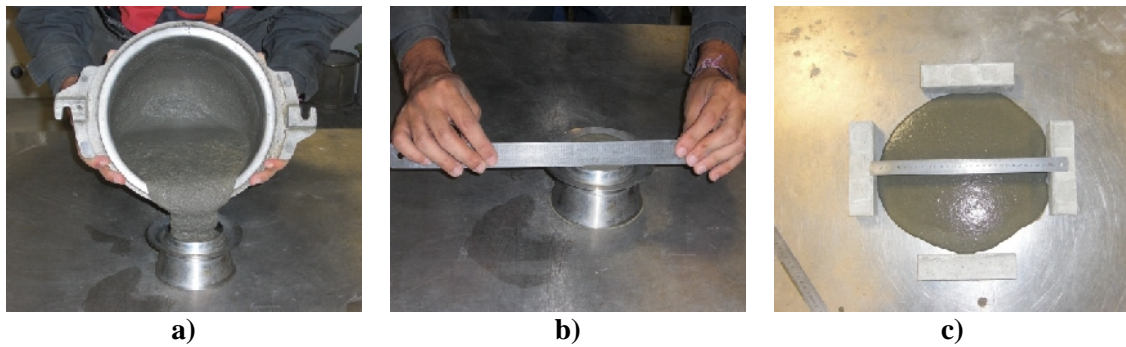


Figura 3.8 – Fases do ensaio de espalhamento: a) enchimento do molde; b) rasamento do topo do molde; c) medição diametral.

O parâmetro é dado pela seguinte expressão:

$$Gm = \left(\frac{D_m}{D_0} \right)^2 - 1 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

- Gm - área de espalhamento relativa;
- Dm - diâmetro médio das leituras (mm) - (d1+d2)/2;
- D0 - diâmetro da base do cone (100mm).

O intervalo de valores admissíveis para este parâmetro é 5.3 Gm 5.9 como referido na (Eq. 2.7).

3.5.3.2 Ensaio de fluidez

Consiste na realização de um ensaio de fluidez efectuado através de um funil em “V”, onde foi registado o tempo que ocorreu desde a abertura da comporta até ao visionamento de luz no fundo do aparelho.

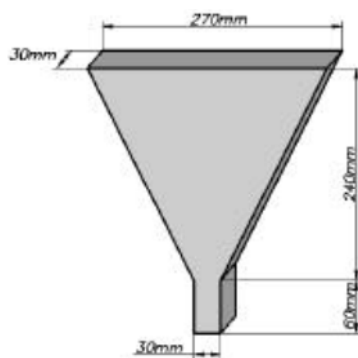


Figura 3.9 Ensaio de fluidez das argamassas. Dimensões do funil V, extraído de [28]

Para a correcta elaboração do ensaio de espalhamento foi necessário garantir:

- Estabilidade e horizontalidade do funil V;
- Humedecimento das paredes interiores do funil V;
- Enchimento do funil V até ao topo e rasá-lo com um objecto com uma superfície regular, por exemplo, um régua metálica, como acontece com o cone;
- Ter especial atenção à abertura e ao visionamento de luz no fundo do funil, que corresponde ao início e fim do cronómetro respectivamente, de modo a não invalidar a o ensaio com um valor medido substancialmente diferente do real.

A Figura 3.10 mostra duas fotografias tiradas durante o ensaio de fluidez:



Figura 3.10 – Fases do ensaio de fluidez das argamassas: a) enchimento do funil; b) cronometragem

O parâmetro é dado pela seguinte expressão:

$$Rm = \frac{10}{t} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

onde:

- Rm - velocidade relativa de escoamento (s^{-1});
- t - tempo de escoamento (da argamassa dentro do funil), em (s).

O intervalo de valores admissíveis para este parâmetro é $1.14 \leq Rm \leq 1.30$ como referido em (Eq. 2.8):

Sempre que a argamassa não correspondia aos valores pretendidos repetia-se o ensaio ajustando e corrigindo os valores V_w/V_p e $Sp/p\%$ de acordo com explicação referida no capítulo anterior no subcapítulo 2.6.1.3.

3.5.4 Ensaios no estado endurecidos

Após a determinação dos dois os parâmetros reológicos (G_m e R_m) para todas as composições procedeu-se à preparação de argamassa com o objectivo de estudar o seu comportamento mecânico, nomeadamente os ensaios de flexão e compressão. Nesta avaliação foi seguida as orientações da norma NP EN 196-1 [45]

3.5.4.1 Moldagem, desmoldagem e conservação dos provetes

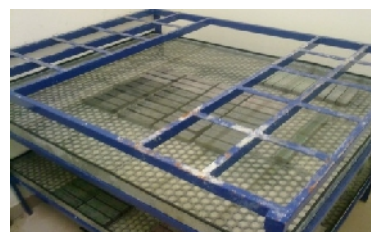
Com os ensaios a realizar aos 7, 28 e 90 dias de presa, foram necessários, por composição de argamassa, 9 provetes moldados, 3 por idade de cura, realizados em moldes padronizados de 160x40x40 mm perfazendo um total de 2,31L/composição. O procedimento de mistura foi o

mesmo dos ensaios de espalhamento e fluidez (Figura 3.5). Foi adoptado o seguinte procedimento:

- montagem e aplicação de óleo descofrante mineral nos moldes prismáticos;
- preparação da argamassa;
- enchimento e rasamento dos moldes;
- identificação dos moldes;
- colocação duma placa acrílica sobre os moldes;
- colocação horizontal na câmara de cura;
- identificação dos provetes e desmoldagem às 24h;
- colocação dos provetes em água a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ para conservação até a data pretendida (orientação seguida pela norma NP EN 196-1 [45]);
- limpeza do equipamento.



b1)



b2)

Figura 3.11 – Moldagem e desmoldagem das argamassas: a) identificação dos provetes; b1) e b2) conservação dos provetes na horizontal na câmara de cura

3.5.4.2 Ensaio de ultrassons

Depois de retirados da câmara foram pesados os provetes e a sua massa registada. De seguida deu-se início ao ensaio de ultrassons. Este ensaio assume uma importância acrescida junto da construção civil uma vez que facultam informações acerca de existência de descontinuidades e defeitos internos nos materiais sem alterar as suas características físicas, químicas, mecânicas, ou

dimensionais e sem interferir com o seu uso posterior [46], constituindo assim uma ferramenta importante para o controlo de qualidade dos materiais.

Os ultrassons são ondas acústicas com uma frequência acima do limite audível normalmente entre os 0,5 e os 25MHz [46] e a sua velocidade de propagação nos provetes depende dos seguintes factores [46]:

- Tipo de cimento;
- Razão entre os constituintes;
- Idade do material;
- Forma de compactação;
- Geometria do provete.

Este ensaio foi realizado em todos os provetes de argamassa e betão conseguidos em laboratório, contando com as seguintes etapas:

- Interligação dos aparelhos (osciloscópio, computador e aparelho de ultrassons (marca: TICO)) (ver Figura 3.12b1);
- Calibração do aparelho de ultrassons: garantir que o tempo decorrido no cilindro de calibração, fornecido com o equipamento, que dista das duas bases 13 cm seja sensivelmente 21,0 μ s;
- Aplicação de vaselina sólida nas faces 4x4 cm nos provetes de argamassa e em duas faces opostas nos provetes de betão para aderência dos transdutores (o emissor e receptor);
- Leitura da velocidade e tempo percorrido pela onda no aparelho de ultrassons e captação do andamento de onda pelo osciloscópio de cada um dos provetes.

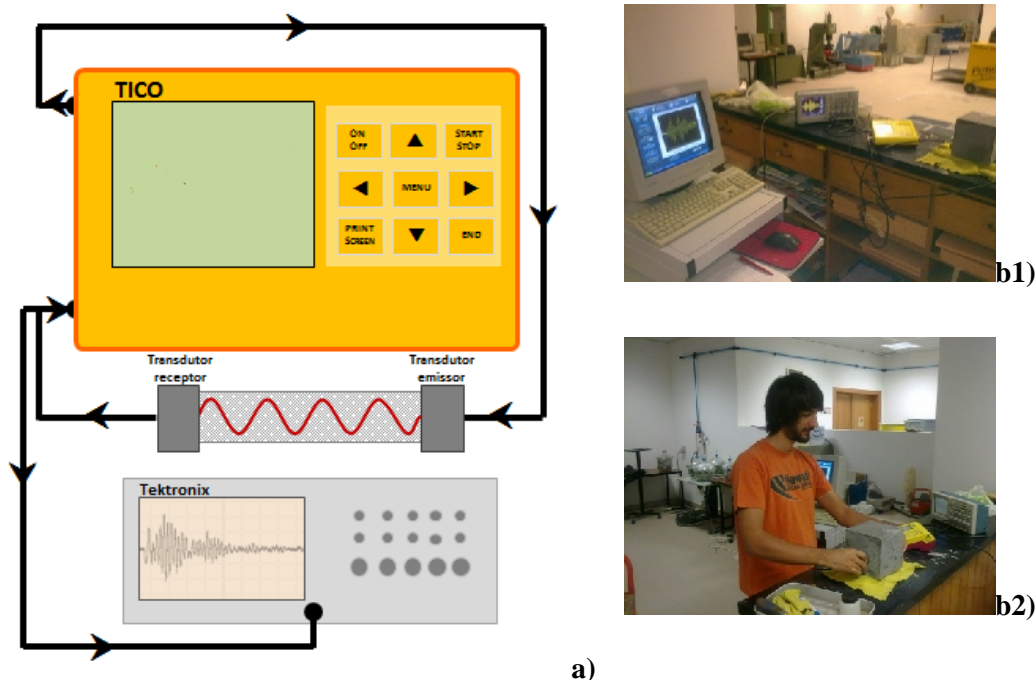


Figura 3.12 – Ensaio de ultrassons: a) esquema de ligação do aparelho ao provete, extraído de [47]; b1) e b2) ligação e manuseamento no laboratório respectivamente

3.5.4.3 Ensaio de resistência à flexão

Nas idades de 7, 28 e 90 dias de presa realizou-se à luz da norma NP EN 196-1 [45] o ensaio de flexão dos provetes. Realizado através duma máquina de ensaio (marca: PERTA) com as especificações e características técnicas indicadas na norma, o ensaio de flexão às argamassas teve o seguinte procedimento de execução:

- Limpeza dos cilindros bem como das superfícies em contacto dos provetes;
- Correcto alinhamento e colocação simétrica do provete relativamente ao cilindro central, com a face de enchimento ficando exposta na lateral devido à sua irregular superfície;
- Aplicação gradual da carga com incrementos não superiores a 50 N/s;
- Cálculo da tensão de rotura à flexão pela seguinte fórmula:

$$\sigma_{flexão} = 1,5 \times \frac{F \times L}{b \cdot h^2} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde:

- $\sigma_{flexão}$ é a tensão de rotura à flexão (Mpa)
- F é a carga máxima (N)
- L é a distância entre os apoios (100mm)
- h é a dimensão do provete paralela ao sentido da carga (40mm)
- b é a dimensão lateral do provete (40mm)

3.5.4.4 Ensaio de resistência à compressão

Com as duas metades do provete provenientes do ensaio de flexão procedeu-se ao ensaio para a determinação da tensão de rotura por compressão, recorrendo ao mesmo aparelho que se realizou o ensaio de determinação da resistência à flexão. O procedimento para este ensaio foi o seguinte:

- Limpeza dos pratos bem como das superfícies em contacto dos provetes;
- Correcto alinhamento e colocação dos provetes relativamente ao prato, garantindo que toda a superfície ficasse enquadrada com o prato, a face de enchimento ficando exposta na lateral devido à sua irregular superfície;
- Aplicação gradual da carga até a rotura do provete;
- Cálculo da tensão de rotura à compressão pela seguinte fórmula:

$$\sigma_{comp} = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

- Sendo:
 - σ_{comp} é a tensão de rotura à compressão (MPa)
 - F é a carga máxima (N)
 - A é a área da secção transversal (40x40mm²)
- Cálculo da média e desvio padrão

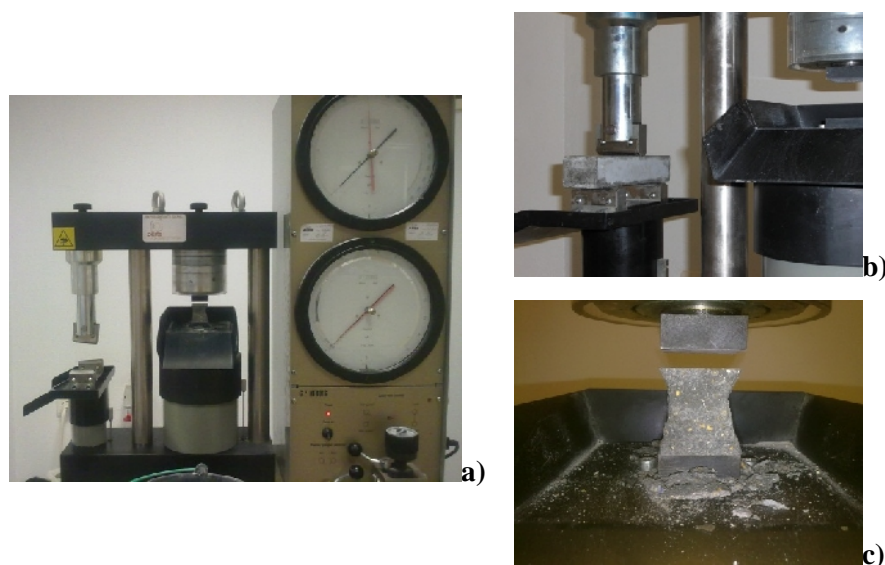


Figura 3.13 – Ensaio mecânico das argamassas: a) aparelho de compressão e flexão; b) provete para ensaio à flexão; c) pedaço do provete após ter sido sujeito ao ensaio de compressão

3.6 Betões

Verificados e avaliados os parâmetros reológicos das argamassas bem como os testes às suas uniformidades e resistências mecânicas, desejou-se avaliar, de uma forma mais alargada, o comportamento dos betões auto-compactáveis mantendo as mesmas razões de adição.

Durante o estado fresco verificou-se a auto-compactabilidade dos BACs através dos ensaios de espalhamento, Funil V e Caixa L. Relativamente aos ensaios no estado endurecido realizou-se o ensaio de avaliação à resistência mecânica, ultrassons, o ensaio à absorção de água por capilaridade e por imersão e ainda o ensaio da análise dimensional.

3.6.1 Preparação e dosagem dos constituintes

Como realizado nas argamassas, determinou-se com base nas equações escritas no subcapítulo 2.6.2.1, a dosagem a usar em cada amassadura, procedendo-se às pesagens, armazenando de seguida os agregados e materiais finos separadamente em bidões indicados para o efeito e a água e o superplastificante em recipientes próprios.

3.6.2 Amassadura

Realizada numa misturadora (marca: PROETI) com 195L de capacidade foi preparado, para enchimento dos moldes relativos aos ensaios de compressão, absorção de água por capilaridade e imersão e análise dimensional, sensivelmente 82L/amassadura. A Figura 3.14 mostra a sequência usada na preparação das amassaduras

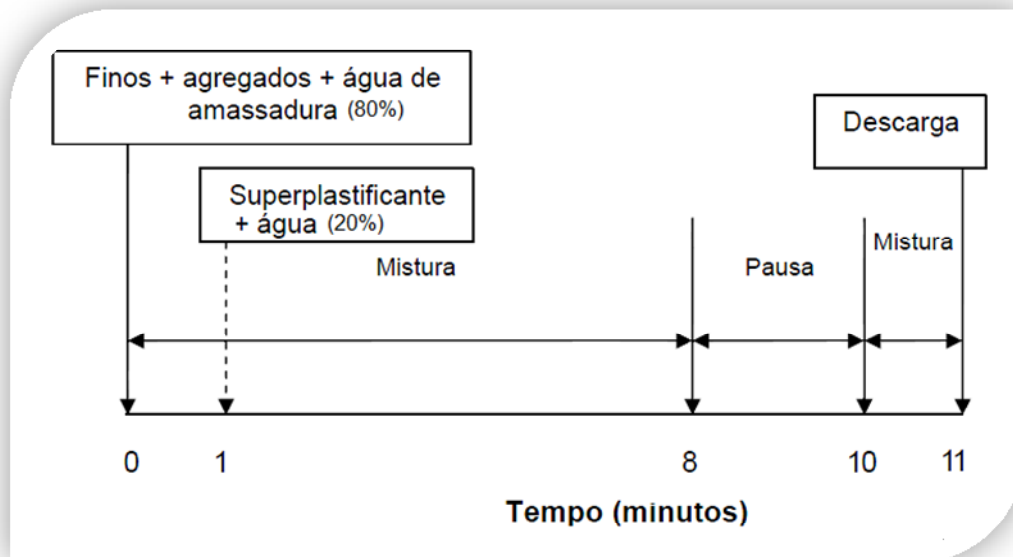


Figura 3.14 – Sequência da amassadura dos betões, adaptado de [2]

3.6.3 Ensaios no estado fresco

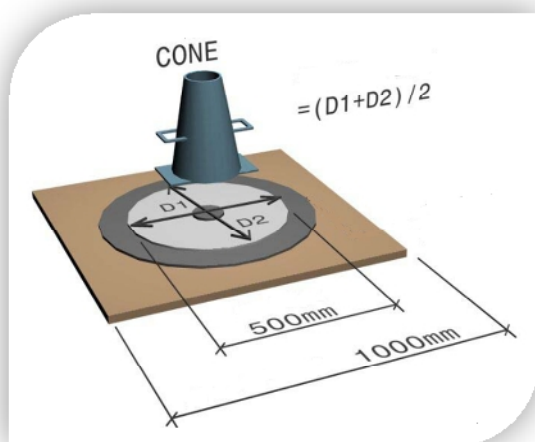
Pretendendo estudar as seguintes características da auto-compactabilidade do betão (*abordadas no subcapítulo 2.5.1.2*), através dos ensaios no estado fresco, a capacidade de enchimento (*ver ensaio 3.6.3.1*), a capacidade de passagem e resistência à segregação (*ver ensaios 3.6.3.2 e 3.6.3.3*) foram seguidas as orientações fornecidas pela norma NP EN 206-9 [3], bem como as normas europeias transpostas para português indicadas para cada um dos ensaios.

3.6.3.1 Determinação do parâmetro Gc (ensaio de espalhamento)

Com recurso a um cone de Abrams (*ver Figura 3.15a*) a determinação deste parâmetro foi realizada através da determinação do diâmetro médio obtido na mesa de espalhamento (ensaio de capacidade de preenchimento). Na realização deste ensaio foi, também, lido o valor T_{500} que

corresponde ao tempo que o betão demora a atingir o valor de 500mm de diâmetro. Foi seguido o seguinte procedimento de ensaio:

- Verificação das condições de trabalho dos materiais, nomeadamente o nivelamento da mesa de ensaio;
- Humedecimento das paredes interiores do cone de Abrams e mesa de ensaio;
- Enchimento do molde até ao topo e rasá-lo com um objecto com uma superfície regular, por exemplo, um régua metálica;
- Levantar o molde, o mais vertical possível, e esperar que todo o betão escorra do molde e caia para a mesa de espalhamento;
- Ler, no cronómetro, o valor obtido à passagem dos 500mm de diâmetro;
- Esperar até que o diâmetro estabilize e realizar as medições diametrais em (mm) (ver *Figura 3.15b*).



a)



b)

*Figura 3.15 – Ensaio de espalhamento nos betões: a)exemplificação e medidas, extraído de [48];
b)medida diametral*

O valor do parâmetro reológico, G_c , que é dado pela seguinte expressão:

$$G_c = \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 - 1 \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Sendo:

- G_c - área de espalhamento relativa;
- D_m - diâmetro médio das medições diametraais (mm);
- D_0 - diâmetro da base do cone (200mm);

Para que um betão se aceite como auto-compactável, à luz da norma europeia NP EN 206-9 [3], o diâmetro de espalhamento e o T500 devem situar-se entre os valores referidos no Quadro 2.1

3.6.3.2 Determinação do parâmetro R_c (ensaio de fluidez)

O ensaio de fluidez é um ensaio de capacidade de passagem realizado através do funil V (*representado na Figura 3.16a*) para determinar o parâmetro reológico R_c . Procedimento para a realização do ensaio:

- Estabilizar o funil V;
- Humedecer as paredes interiores do funil V;
- Encher o funil V até ao topo e rasá-lo com um objecto com uma superfície regular, por exemplo, um régua metálica, como acontece com o cone de Abrams;
- Ter especial atenção à abertura da comporta e ao visionamento de luz no fundo do funil, que corresponde ao início e fim do accionamento do cronómetro respectivamente, de modo a não invalidar a este ensaio (*ver Figura 3.16b*).

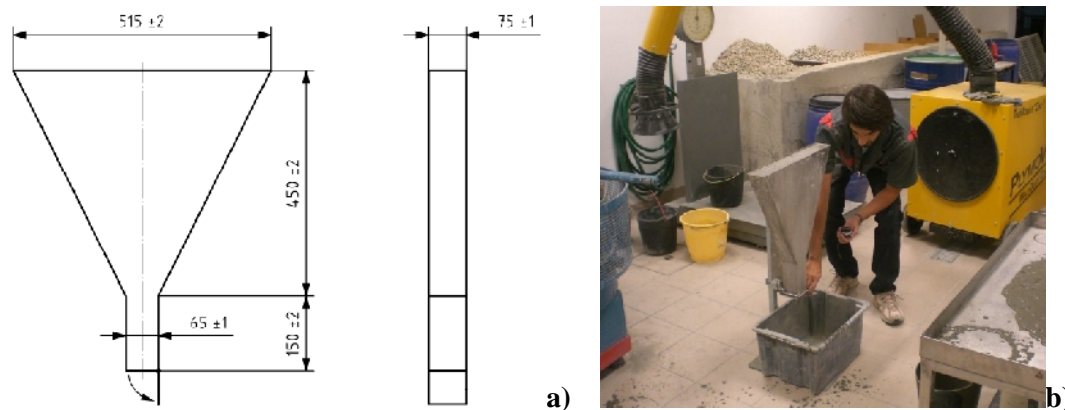


Figura 3.16 – Ensaio de fluidez dos betões: a) medidas do aparelho, adaptado de [49]; b) início da abertura da comporta seguida de cronometragem

O resultado é apresentado em segundos ou adicionalmente pelo parâmetro reológico que é dado pela seguinte expressão:

$$Rc = \frac{10}{t} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Sendo:

- Rc - velocidade relativa de escoamento (s^{-1});
- t - tempo de escoamento (s).

Para que um betão se aceite como auto-compactável, à luz da norma europeia NP EN 206-9 [3], o tempo de escoamento deve situar-se entre os valores referidos no Quadro 2.1

3.6.3.3 Ensaio de Caixa L

Neste ensaio, enquadrado pela norma NP EN 12350-10 [50], o betão foi sujeito a um escoamento através de barras metálicas sendo assim avaliado a sua capacidade de passagem e resistência à

segregação. Registou-se o valor da altura da coluna vertical H_1 e o valor H_2 na extremidade da caixa (como nos mostra a Figura 3.17) e calculado a taxa de bloqueio (H_2/H_1).

Procedimento de ensaio:

- Verificar condições de não conformidade no aparelho;
- Limpar e humedecer as paredes da caixa;
- Colocar a caixa num local horizontal e estável;
- Encher a coluna com o betão sem compactação;
- Abrir a comporta da caixa e deixar o betão fluir através das barras e esperar que estabilize;
- Leitura das alturas.

Os valores de taxa de bloqueios (H_2/H_1) superiores a 0,8 são considerados como aceitáveis para obtenção de um BAC [50] [3] [2].

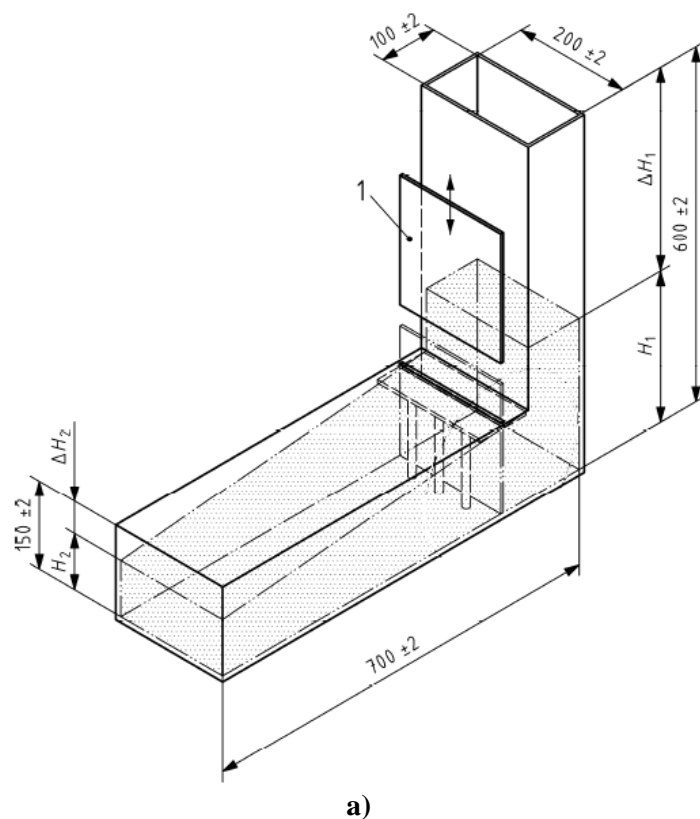


Figura 3.17 – Ensaio caixa L: a) dimensões do aparelho, adaptado de [50]; b) enchimento da caixa para realização do ensaio

3.6.3.4 Ensaio de anel J

Este ensaio foi realizado à luz da norma NP EN 12350-12 [51] e consiste em verificar a capacidade de passagem do betão, através do levantamento do cone de Abrams inserido num anel com 300 mm de diâmetro munido de barras verticais separadas entre si por 41 mm e com 18mm de diâmetro [51]. Registaram-se as alturas indicadas na Figura 3.18, bem como o tempo T_{500} (tempo em que o espalhamento demora atingir os 500mm de diâmetro). O seu procedimento e metodologia de execução é em tudo semelhante ao ensaio de espalhamento simples tendo o cuidado adicional de centrar correctamente o cone com o anel e accionar o cronómetro no momento preciso. Visualmente pode-se ainda observar a ocorrência de segregação [52].

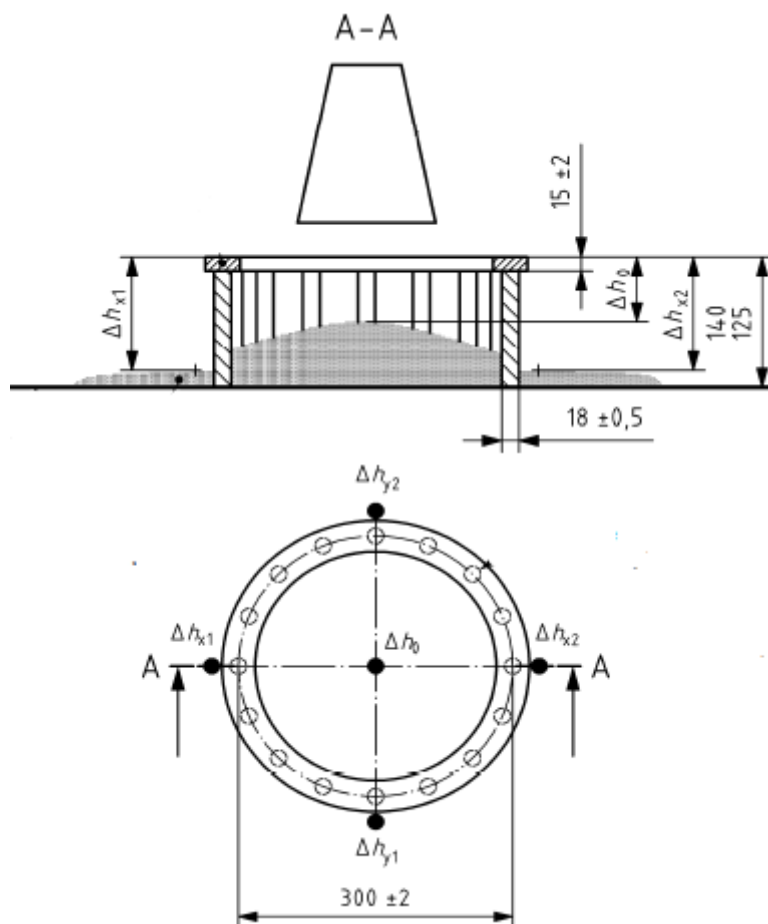


Figura 3.18 – Ensaio de anel J: dimensões do anel

Após registada as alturas calcula-se o valor PJ:

$$PJ = \frac{Hx1 + Hx2 + Hy1 + Hy2}{4} - H0 \quad (\text{Eq. 3.7})$$

A norma NP EN 206-9 [3] indica nas classes de consistência a classificação PJ2 para valores PJ 10mm (ver *Quadro 2.1*).

3.6.4 Ensaio no estado endurecido

Para o enchimento dos moldes foi necessário preparar, já contabilizando as perdas de BAC durante o processo, 82 L/amassadura. Os moldes utilizados para cada composição foram os seguintes:

- 9 moldes cúbicos, de 15 cm de aresta, para o ensaio de compressão;
- 1 molde cilíndrico, de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, para o ensaio de capilaridade;
- 3 moldes cúbicos, de 10 cm de aresta, para o ensaio de absorção por compressão;
- 2 moldes prismáticos, 15x15x50 cm de arestas, para o ensaio de análise dimensional.

Para todos estes moldes foi realizado o seguinte procedimento até às respectivas datas de ensaio (ver *Figura 3.19*):

- Enchimento dos moldes sem auxílio a qualquer método de compactação ou vibração;
- Cobriu-se, com um plástico, os provetes até à sua desmoldagem às 24h;
- Identificação dos provetes na face de enchimento;
- Após a desmoldagem, conservação, até à data de ensaio, dos provetes em água na câmara de cura a temperatura constante igual a 20 ± 2 °C e humidade relativa de $95 \pm 5\%$;

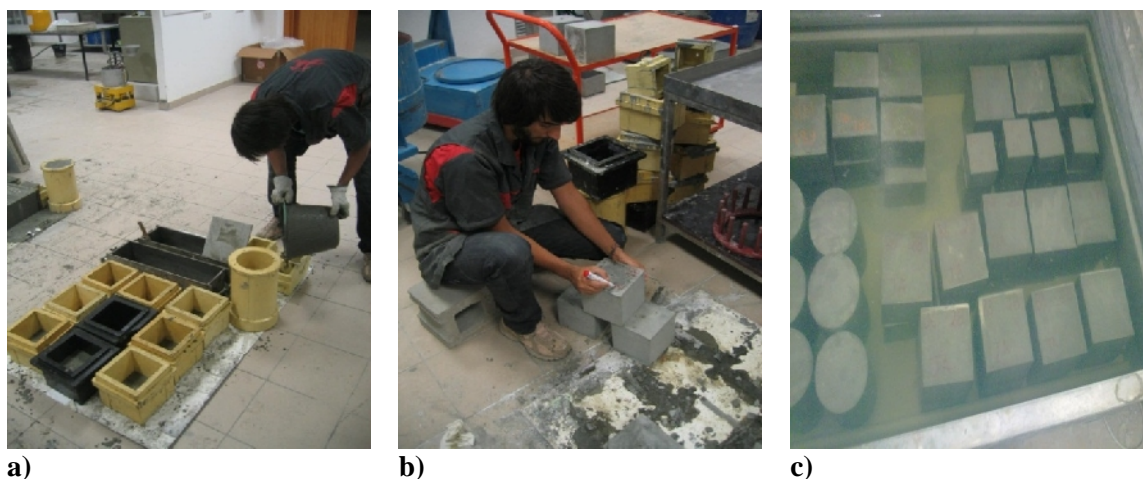


Figura 3.19 – Preparação dos provetes para os ensaios no estado endurecido a) enchimento dos moldes; b) identificação dos provetes; c) conservação em água na câmara de cura

3.6.4.1 Ensaio de ultrassons

O ensaio de ultrassons foi realizado nos provetes destinados ao ensaio de compressão. O método usado foi exactamente igual ao usado nos provetes das argamassas. Desta forma, remete-se a explicação do ensaio para o subcapítulo 3.5.4.2.

3.6.4.2 Ensaio de resistência à compressão

Apoiado pela serie de normas NP EN 12390-3 [53] e da NP EN 206-1 [43] foram utilizados para a determinação da resistência à compressão 3 provetes por idade de presa, 7, 28 e 90 dias com 15 cm de aresta para cada diferente composição de argamassa. Foi realizado o seguinte procedimento:

- Antes do ensaio na presa pesou-se os cubos saturados sem excesso de água nas superfícies;
- Mediu-se com o auxílio de uma craveira as dimensões dos cubos em 3 direcções distintas;
- Centrando o cubo no prato da prensa, com a face de enchimento sem estar em contacto com nenhum dos pratos, deu-se início ao ensaio de compressão com incrementos de carga compreendidos entre os $0,6 \pm 0,2$ MPa/s;

- Quando atingida a rotura observou-se a figura de rotura do provete (*ver Figura 3.20*);
- Registou-se a leitura da força de rotura e calculou-se a respectiva tensão de rotura à compressão de cada um dos provetes através da seguinte expressão:

$$f_{c,cube} = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

- Sendo:
 - $f_{c,cube}$ - Resistência à compressão do betão determinada em cubos (MPa)
 - F - Força de rotura (N)
 - A - área de secção do provete (mm)
- Cálculo da média e desvio padrão.



Figura 3.20 – Ensaio de compressão dos betões: provete após o ensaio

3.6.4.3 Ensaio da absorção de água por capilaridade

Na determinação da absorção de água por capilaridade foi seguido o procedimento escrito na documentação normativa – especificação LNEC – E 393 [54]. Assim, após moldados os provetes cilíndricos indicados pela especificação (diâmetro = 150mm e altura = 300mm) foi realizada a seguinte técnica:

- Conservação dos provetes cilíndricos em água durante 14 dias na câmara de cura a temperatura constante igual a 20 ± 2 °C e humidade relativa de $95 \pm 5\%$;

- Secagem dos provetes em estufa à temperatura de 40 ± 5 °C durante 14 dias;
- Ao 28º dia de idade realizou-se a leitura da massa inicial, esperou-se que a temperatura estabilizasse e colocou-se os provetes num tabuleiro com a face de enchimento, ou seja, a fase que não ficou em contacto com as paredes do molde, no topo;
- Encheu-se, cuidadosamente, o tabuleiro com água até que a sua superfície atingisse 5 ± 1 mm acima da face inferior do provete;
- Procedeu-se às medições ao fim de 3, 6, 24 e 72h das massas e das alturas de água. Estas medidas foram realizadas ao longo de 4 geratrizes igualmente espaçadas, de cada um dos provetes após colocá-los durante 60 ± 5 s numa base não absorvente. De seguida inseriu-se os provetes novamente no tabuleiro.
- Calculou-se a média aritmética das alturas de água dos provetes em cada idade e a absorção por capilaridade:

$$A_{ci} = \frac{M_i - M_0}{\text{Área}} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Sendo:

- A_{ci} - absorção de água no tempo t_i (g/mm^2);
 - M_i - massa do provete no tempo t_i (g);
 - M_0 - massa inicial do provete (g);
 - Área - área de contacto com a água ($17671,46\text{mm}^2$).
- Por fim calculou-se o coeficiente de absorção de capilaridade (K_c) através do declive da recta que melhor se ajusta ao gráfico (Kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo (t) em horas. Para uma melhor percepção da absorção de água por capilaridade nos betões preparados também foi calculado o coeficiente para as primeiras 6h de ensaio ($K_{c_{6h}}$)

Relativamente ao coeficiente de absorção de capilaridade K_c :

- K_g – massa do provete medida no tempo “h”;
- m^2 – área da base do cilindro ($0,017671\text{m}^2$);
- h – hora que foi realizado o ensaio.



Figura 3.21 – Provetes, e respectiva identificação, do ensaio de absorção por capilaridade

3.6.4.4 Ensaio da absorção de água por imersão

Na determinação da absorção de água por capilaridade foi seguido o procedimento escrito na documentação normativa – especificação LNEC – E 394 [55]. Na realização deste ensaio foram usados provetes cúbicos com 10 cm de aresta, tendo sido adoptado o seguinte procedimento:

- Depois dum período de 28 dias, conservados em água, determinou-se a massa m_1 correspondente à massa do provete saturado após atingida a massa constante (é considerado massa constante quando a diferença de duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 24h, for inferior a 0,1% da média das duas leituras);
- Determinou-se a massa hidrostática m_2 , fazendo imergir os provetes em água (*ver Figura 3.22*);
- Secou-se os provetes numa estufa ventilada a 105 ± 5 °C até estes atingirem a sua massa constante m_3 (é considerado massa constante quando a diferença de duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 24h, for inferior a 0,1% da média das duas leituras);
- Calculou-se a absorção de água por imersão:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Sendo:

- A_i - absorção de água por imersão (%);

- m_1 - massa do provete saturado (g);
- m_2 - massa hidrostática do provete saturado (g);
- m_3 - massa do provete seco (g).



Figura 3.22 – Ensaio de absorção por imersão, pesagem da massa hidrostática

3.6.4.5 Ensaio de análise dimensional

Na realização deste ensaio utilizou-se um extensómetro (marca: BAKER), com precisão apropriada (5×10^{-6} m) e de abertura até 5 mm, seguindo a normativa E 398 [56]. Utilizou-se dois provetes prismáticos por amassadura de secção quadrada 15x15 cm e 50 cm de comprimento. Adoptou-se a seguinte metodologia:

- Com os provetes já desmoldados, traçou-se a lápis, uma linha horizontal numa das faces laterais;
- Foram fixados, com massa-cola, sobre esta linha dois pernos, distanciados entre si de 30 cm e cada um 15 cm das secções centrais dos provetes através do auxílio do equipamento padrão do extensómetro;
- As leituras das extensões dos provetes foi, no mínimo, realizada em dias alternados nos primeiros 14 dias e, a partir destes até aos 90 dias, as leituras foram gradualmente sendo realizadas com maior intervalo entre si, uma vez que, como se sabe, também o valor da variação da retracção vai diminuindo ao longo do tempo sendo que o valor final da retracção dos provetes tende para uma assíntota como se mostra no subcapítulo 4.3.3.5.

- Apresenta-se os resultados da retração/expansão pela seguinte expressão:

$$= \frac{df - di}{di} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

- Onde:
 - df : distância medida entre os pernos nos dias de ensaio;
 - di : distância inicial medida entre os pernos.

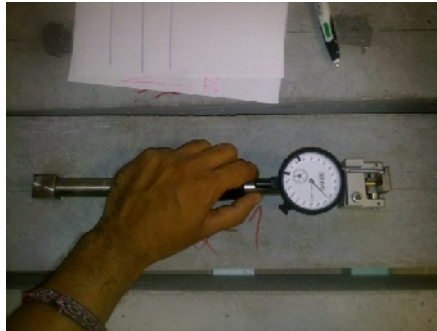


Figura 3.23 Ensaio de análise dimensional, leitura da retração/expansão através do extensómetro

4 Análise dos resultados obtidos

4.1 Considerações gerais

No presente capítulo irão ser apresentados e apreciados os resultados laboratoriais obtidos ao longo da campanha. Estes resultados e a sua análise serão, sempre que possível, suportados em de quadros e gráficos demonstrativos de modo a facilitar a sua interpretação dos valores das diferentes composições de finos.

Como no capítulo anterior, a estrutura deste capítulo seguirá a ordem cronológica dos ensaios realizados no laboratório, ou seja, primeiro argamassas e depois serão apresentados os resultados dos ensaios obtidos para os betões.

4.2 Argamassas

4.2.1 Caracterização no estado fresco

4.2.1.1 Acertos concertado da reologia

Conforme foi referido no subcapítulo 3.5.3 levou-se a cabo uma serie de amassaduras com intuito de investigar os parâmetros reológicos G_m e R_m , de cada uma das composições através duma alteração concertada dos parâmetros de composição da mistura.

A última linha dos seguintes quadros aponta os valores da reologia alcançados de acordo com os intervalos estabelecidos nas equações (Eq. 2.7) e (Eq. 2.8). Após se ter efectuado uma alteração concertada dos parâmetros de composição (*ver subcapítulo 2.6.1.3*) registou-se esses valores nas linhas anteriores, com excepção dos quadros (Quadro 4.4) e (Quadro 4.5) onde se verificou exsudação e assim a impossibilidade de continuar os estudos das composições de finos correspondentes, 30 e 40% de adição de catalisador exausto FCC.

Quadro 4.1 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.100C

A.100C	Parâmetros da composição		Leituras			Reologia	
	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm(s ⁻¹)
A.100C - 1	0,80	1,60	190	195	13,78	2,71	0,73
A.100C - 2	0,82	1,80	260	260	7,85	5,76	1,27

Quadro 4.2 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.90C+10FCC

A.90C+10FCC	Parâmetros da composição		Leituras			Reologia	
	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm(s ⁻¹)
A.90C+10FCC - 1	0,80	1,60	185	185	26,09	2,42	0,38
A.90C+10FCC - 2	0,90	1,40	269	250	8,07	5,73	1,24

Quadro 4.3 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.80C+20FCC

A.80C+20FCC	Parâmetros da composição		Leituras			Reologia	
	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm(s ⁻¹)
A.80C+20FCC - 1	0,93	1,40	300	295	12,35	7,85	0,81
A.80C+20FCC - 2	0,95	1,10	245	250	14,62	5,13	0,68
A.80C+20FCC - 3	1,10	0,80	305	300	3,97	8,15	2,52
A.80C+20FCC - 4	1,00	0,95	285	290	7,80	7,27	1,28
A.80C+20FCC - 5	1,00	0,90	290	295	7,01	7,56	1,43
A.80C+20FCC - 6	0,98	0,85	255	255	12,06	5,50	0,83
A.80C+20FCC - 7	0,99	0,82	275	280	9,39	6,70	1,06
A.80C+20FCC - 8	1,00	0,80	255	260	8,70	5,63	1,15

Quadro 4.4 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.70C+30FCC

A.70C+30FCC	Parâmetro da composição		Leituras			Reologia	
	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm(s ⁻¹)
A.70C+30FCC - 1	1,05	0,75	X	x	x	x	x
A.70C+30FCC - 2	1,25	0,78	X	x	x	x	x
A.70C+30FCC - 3	1,15	0,78	X	x	x	x	x
A.70C+30FCC - 4	1,05	1,35	X	x	x	x	x

Quadro 4.5 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.60C+40FCC

A.60C+40FCC	Parâmetro da composição		Leituras			Reologia	
	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm(s ⁻¹)
A.60C+40FCC - 1	1,25	0,65	x	x	x	x	x

Quadro 4.6 – Alteração concertada dos parâmetros reológicos da composição A.75C+25FCC

A.75C+25FCC	Parâmetro da composição		Leituras			Reologia	
	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm(s ⁻¹)
A.75C+25FCC - 1	1,05	0,75	280	285	12,71	6,98	0,79
A.75C+25FCC - 2	1,08	0,72	300	285	7,34	7,56	1,36
A.75C+25FCC - 3	1,07	0,70	280	285	9,30	6,98	1,08
A.75C+25FCC - 4	1,08	0,67	270	275	5,83	6,43	1,72
A.75C+25FCC - 5	1,07	0,68	250	255	7,81	5,38	1,28

As figuras seguintes, Figura 4.1 a Figura 4.4, apresentam os pontos coordenados (Gm e Rm) que se obtiveram através dos ensaios de espalhamento e fluidez para cada composição (ver subcapítulos 3.5.3.1 e 3.5.3.2). (Ver também metodologia adoptada para o acerto da reologia no subcapítulo 2.6.1.3).

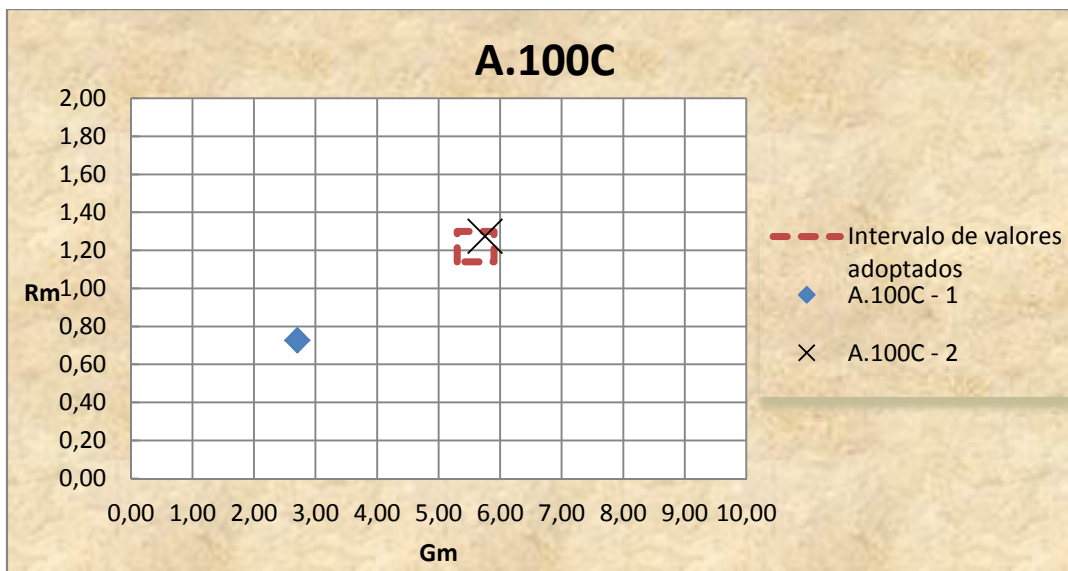


Figura 4.1 – Valores dos parâmetros reológicos (Rm e Gm) das amassaduras realizadas da composição de finos A.100C obtidos através do acerto concertado dos parâmetros de composição Vw/vp e Sp/p%

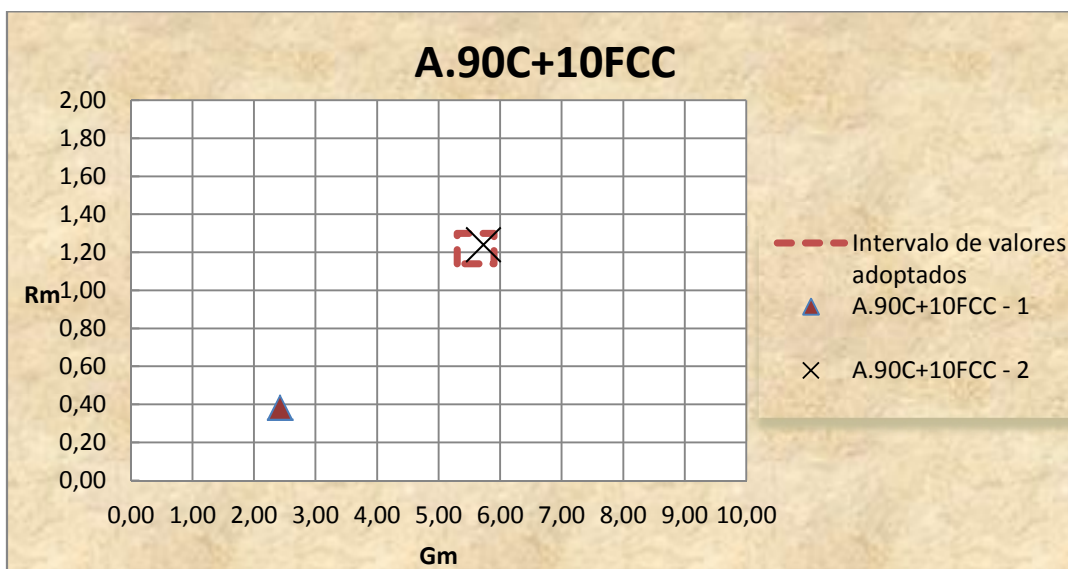


Figura 4.2 – Valores dos parâmetros reológicos (Rm e Gm) das amassaduras realizadas da composição de finos A.90C+10FCC obtidos através do acerto concertado dos parâmetros de composição Vw/vp e Sp/p%

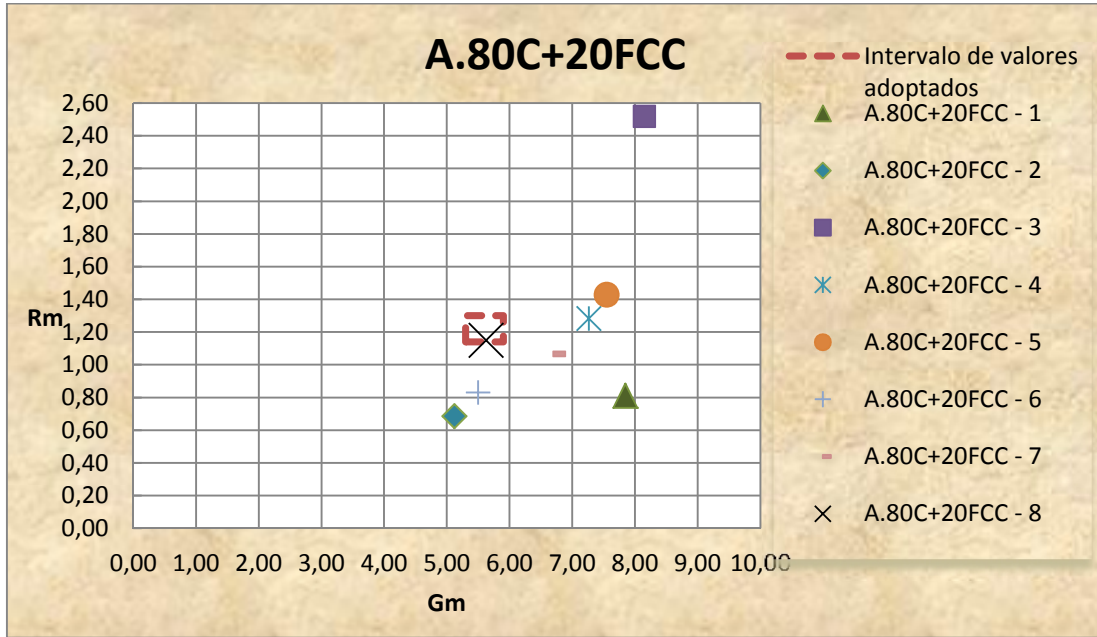


Figura 4.3 – Valores dos parâmetros reológicos (R_m e G_m) das amassaduras realizadas da composição de finos A.80C+20FCC obtidos através do acerto concertado dos parâmetros de composição V_w/v_p e $S_p/p\%$

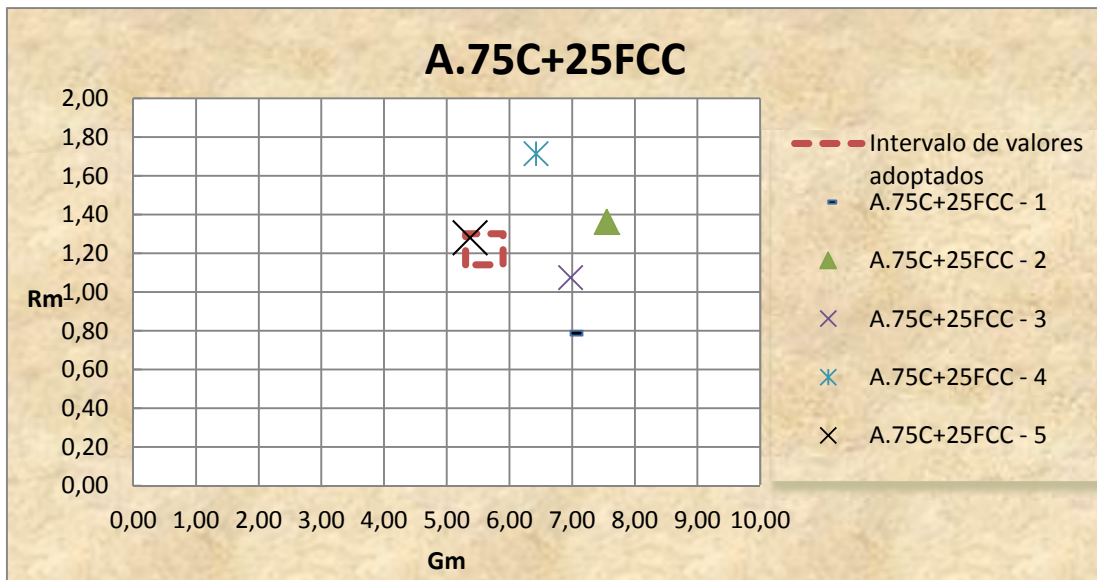


Figura 4.4 – Valores dos parâmetros reológicos (R_m e G_m) das amassaduras realizadas da composição de finos A.75C+25FCC obtidos através do acerto concertado dos parâmetros de composição V_w/v_p e $S_p/p\%$

A Figura 4.5 e Figura 4.6 mostram a linearidade existente entre a percentagem de adição do catalisador exausto de FCC com os parâmetros de composição V_w/V_p e $S_p/p\%$ respectivamente.

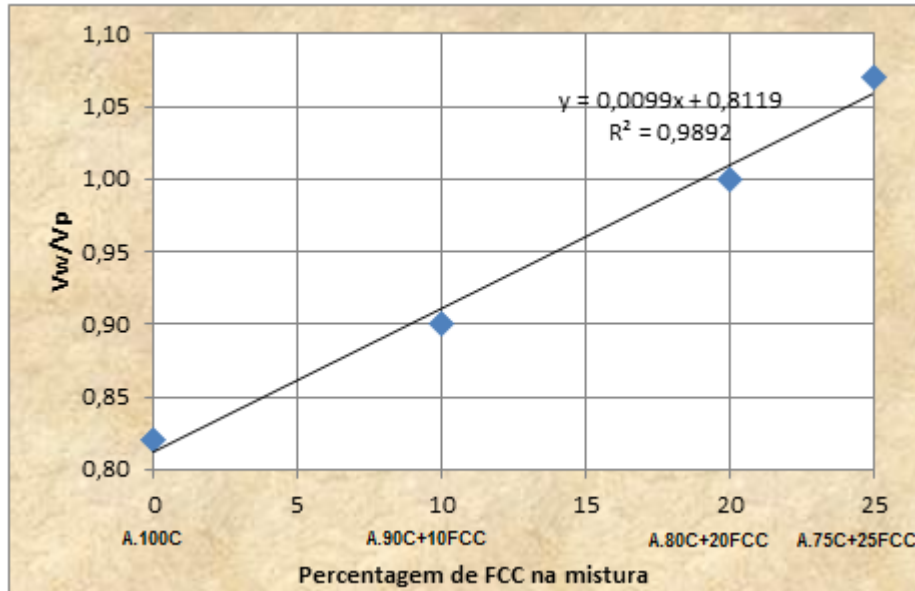


Figura 4.5 – Variação do valor V_w/V_p com o aumento da percentagem de adição de catalisador exausto de FCC na composição (Recta demonstrativa da correlação linear existente)

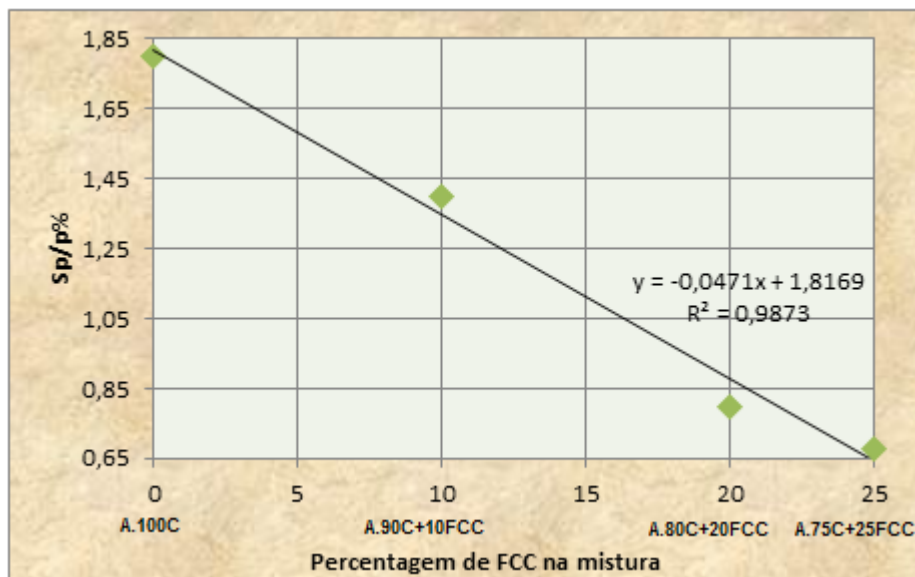


Figura 4.6 - Variação do valor $S_p/p\%$ com o aumento da percentagem de adição de catalisador exausto de FCC na composição. (Recta demonstrativa da correlação linear existente)

Da análise dos gráficos que estão apresentados na Figura 4.5 e na Figura 4.6 conclui-se que, para uma maior percentagem de adição é necessário fornecer à amassadura uma maior quantidade de água e assim um menor teor de superplastificante. Este facto pode ser explicado pela elevada área superficial específica do catalisador exausto de FCC com elevada afinidade para a água [19]. Ao ser incorporado nas amassaduras, e para os mesmos teores de água e adjuvante, o catalisador exausto de FCC conduz a uma perda de fluidez e de trabalhabilidade da argamassa. Logo para obtenção de parâmetros reológicos no mesmo intervalo de valores, uma composição com maior teor de catalisador exausto de FCC requer maiores quantidades de água.

O quadro Quadro 4.7 sintetiza, os quadros apresentados atrás (Quadro 4.1 a Quadro 4.6) relativamente aos valores dos parâmetros de composição das argamassas conducentes à reologia pretendida (*apresentado nas relações (Eq. 2.7) (Eq. 2.8)*).

Quadro 4.7 – Quadro resumo dos valores V_w/V_p e $Sp/p\%$, de cada uma das composições, conducentes à reologia pretendida

	V_w/V_p	$Sp/p\%$
A.100C	0,82	1,80
A.90C+10FCC	0,90	1,40
A.80C+20FCC	1,00	0,80
A.75C+25FCC	1,07	0,68

4.2.2 Caracterização do estado endurecido

4.2.2.1 Velocidade de propagação das ondas sónicas

O Quadro 4.8 apresenta as velocidades de propagação, média e desvio padrão, obtidos no ensaio de ultrassons em todos os provetes das composições de argamassa preparadas no laboratório.

Quadro 4.8 – Velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes de argamassa ensaiados e respectiva média e desvio padrão (DP)

		7 dias		28 dias		90 dias	
		Vel. (m/s)	Média(m/s) e DP.	Vel. (m/s)	Média(m/s) e DP.	Vel. (m/s)	Média(m/s) e DP.
A.100C	A.100 - 1	4410	4393 ± 47	4560	4553 ± 90	4720	4670 ± 50
	A.100 - 2	4340		4460		4620	
	A.100 - 3	4430		4640		4670	
A.90C+10FCC	A.90C+10FCC - 1	4370	4390 ± 92	4560	4583 ± 21	4650	4653 ± 35
	A.90C+10FCC - 2	4310		4590		4690	
	A.90C+10FCC - 3	4490		4600		4620	
A.80C+20FCC	A.80C+20FCC - 1	4290	4313 ± 40	4430	4450 ± 26	4490	4500 ± 17
	A.80C+20FCC - 2	4290		4440		4490	
	A.80C+20FCC - 3	4360		4480		4520	
A.75C+25FCC	A.75C+25FCC - 1	4090	4133 ± 51	4380	4397 ± 29	4600	4547 ± 92
	A.75C+25FCC - 2	4120		4430		4440	
	A.75C+25FCC - 3	4190		4380		4600	

O gráfico que se apresenta na Figura 4.7 mostra a velocidade média dos ultrassons nas idades de hidratação dos provetes aos 7, 28 e 90 dias, enquanto a Figura 4.8 indica a evolução que se verificou nos provetes de argamassa com o decorrer do tempo até aos 90 dias de idade dos provetes.

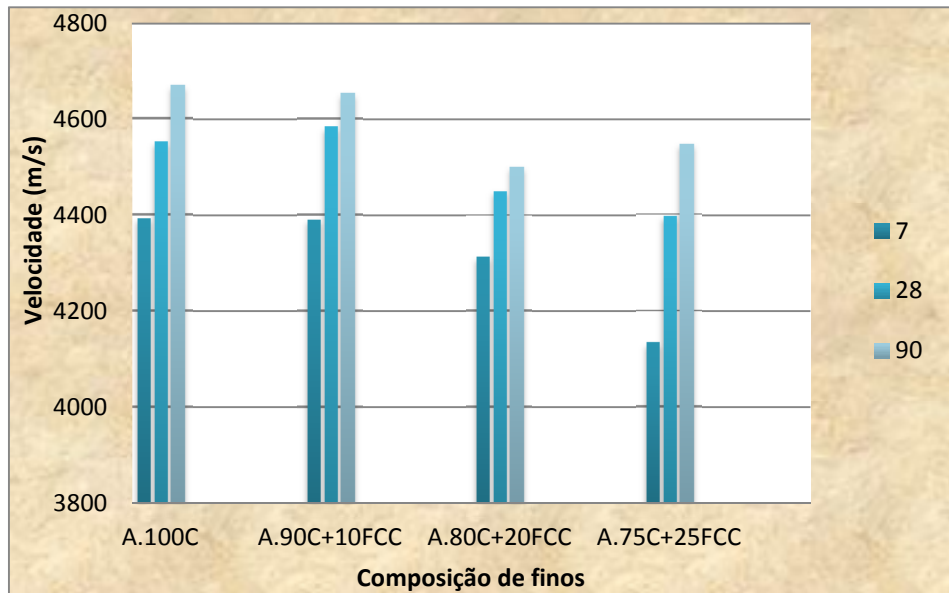


Figura 4.7 – Velocidade média de propagação dos ultrassons das argamassa nas idades de referência (7, 28 e 90 dias)

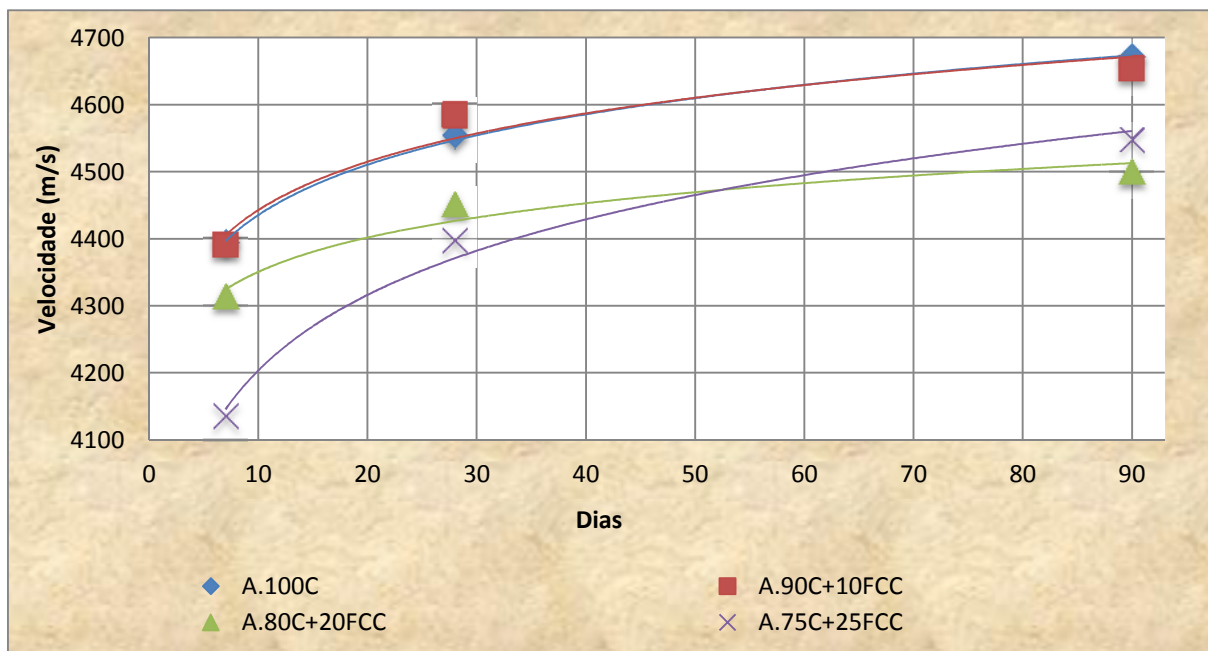


Figura 4.8 - Evolução da velocidade de propagação média dos ultrassons dos provetes de betão ao longo do tempo de hidratação.

Dos resultados obtidos e apresentados nas figuras acima, verifica-se o aumento da velocidade de propagação das ondas sónicas nos provetes de argamassa com o decorrer do tempo de hidratação dos provetes (7, 28 e 90 dias), devido ao conseqüente aumento da densificação da matriz cimentícia. Isto acontece pois o som propaga-se com facilidade em meios mais densos.

(Mais à frente os resultados deste ensaios são correlacionados com os resultados do ensaio de resistência à compressão no subcapítulo 4.2.2.3)

Durante a campanha experimental recolheu-se a componente longitudinal das formas de onda. No entanto, o tratamento destes resultados sai fora do âmbito desta dissertação. Contudo as apresentam-se duas formas de onda que se obtiveram no ANEXO D - Ondas longitudinais obtidas no osciloscópio.

4.2.2.2 Resistência à flexão

O Quadro 4.9 apresenta o valor da resistência à flexão, média e desvio padrão, obtidos no ensaio de resistência à flexão em todos os provetes das diferentes composições de argamassa preparadas no laboratório.

Quadro 4.9 – Tensão de rotura à flexão dos provetes de argamassa ensaiados e respectiva média e desvio padrão

		7 dias		28 dias		90 dias	
		Tensão de rot. (Mpa)	Média (Mpa) e Desvio Padrão	Tensão de rot. (Mpa)	Média (Mpa) e Desvio Padrão	Tensão de rot. (Mpa)	Média (Mpa) e Desvio Padrão
A.100C	A.100 - 1	17,93	16,9 ± 1,2	16,41	16,8 ± 0,4	17,34	17,0 ± 0,8
	A.100 - 2	15,59		17,11		17,58	
	A.100 - 3	17,11		16,88		16,17	
A.90C+10FCC	A.90C+10FCC - 1	15,47	16,0 ± 1,8	14,53	14,3 ± 0,6	15,23	16,9 ± 1,5
	A.90C+10FCC - 2	14,53		14,77		18,05	
	A.90C+10FCC - 3	17,93		13,59		17,34	
A.80C+20FCC	A.80C+20FCC - 1	11,60	13,7 ± 2,2	12,89	12,3 ± 0,7	13,36	13,1 ± 0,2
	A.80C+20FCC - 2	13,59		11,48		13,13	
	A.80C+20FCC - 3	15,94		12,42		12,89	
A.75C+25FCC	A.75C+25FCC - 1	10,31	11,3 ± 0,8	10,08	10,2 ± 0,1	9,61	10,3 ± 0,6
	A.75C+25FCC - 2	11,72		10,31		10,55	
	A.75C+25FCC - 3	11,72		10,31		10,78	

.O gráfico que se apresenta na Figura 4.9 mostra a resistência à flexão média dos provetes nas idades de hidratação de 7, 28 e 90 dias

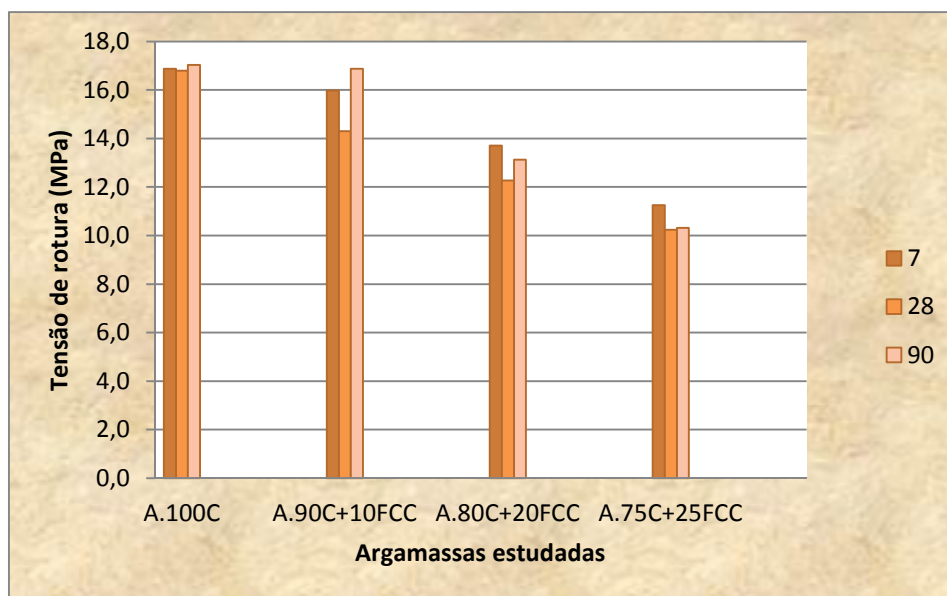


Figura 4.9 - Tensão média de rotura à flexão dos provetes de argamassa nas idades de referência (7, 28 e 90 dias)

Nos resultados de resistência à flexão, que estão apresentados na Figura 4.9, verifica-se que para a argamassa A.100C a resistência à flexão se manteve constante com o tempo de hidratação dos provetes, uma vez que os valores se enquadram dentro dos desvios padrões apresentados no Quadro 4.9. No que concerne às argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC verifica-se uma tendência de diminuição no valor da resistência à flexão dos 7 para os 28 dias, e uma tendência de acréscimo de resistência dos 28 para os 90 dias. Esta situação anómala pode ser justificada pela tensão de rotura à flexão não apresentar variações significativas ao longo do tempo, e a mínima variação na leitura conduzir a oscilações aparentes do valor. Ainda, a amostra pode não ser estatisticamente representativa para a variabilidade que os materiais à base de cimento apresentam [19].

Outro dado que se retira do gráfico da Figura 4.9 é a sucessiva perda de resistência com o incremento de catalisador exausto de FCC na mistura, como se ilustra no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 – Perda de tensão à flexão com o aumento da incorporação de catalisador exausto de FCC

	Tensão média aos 7, 28 e 90 dias (MPa)	Perda de tensão (%)
A.100C	16,9	
		7,01
A.90C+10FCC	15,7	
		17,07
A.80C+20FCC	13,0	
		18,68
A.75C+25FCC	10,6	

4.2.2.3 Resistência à compressão

Como referido atempadamente no subcapítulo 3.5.4.4, o ensaio de resistência à compressão efectuou-se após o ensaio de resistência à flexão, permitindo assim duas leituras de carga de rotura à compressão por provete. Os três quadros que se seguem (*Quadro 4.11 a Quadro 4.13*) apresentam estes dois valores de resistência à compressão (carga e respectiva tensão de rotura), a média e desvio padrão para as idades de hidratação das argamassas aos de 7, 28 e 90 dias.

Quadro 4.11 - Tensão de rotura à compressão, aos 7 dias de idade, dos provetes de argamassa ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão

7 dias		Carga (KN)/Tensão (MPa)-1		Carga (KN)/Tensão (MPa)-2		Tensão média (MPa)	Desvio Padrão
A.100C	A.100 - 1	122	76,3	121	75,6	77,6	1,6
	A.100 - 2	123,5	77,2	125,5	78,4		
	A.100 - 3	122	76,3	131	81,9		
A.90C+10FCC	A.90C+10FCC - 1	140	87,5	142	88,8	90,7	2,7
	A.90C+10FCC - 2	148	92,5	142	88,8		
	A.90C+10FCC - 3	147	91,9	152	95,0		
A.80C+20FCC	A.80C+20FCC - 1	126	78,8	141	88,1	83,6	0,7
	A.80C+20FCC - 2	132	82,5	134	83,8		
	A.80C+20FCC - 3	135	84,4	135	84,4		
A.75C+25FCC	A.75C+25FCC - 1	124,5	77,8	127	79,4	77,0	1,4
	A.75C+25FCC - 2	119	74,4	124	77,5		
	A.75C+25FCC - 3	123	76,9	122	76,3		

Quadro 4.12 - Tensão de rotura à compressão, aos 28 dias de idade, dos provetes de argamassa ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão

28 dias		Carga (KN)/Tensão (MPa)-1		Carga (KN)/Tensão (MPa)-2		TENSÃO (MPa)	Desvio Padrão
A.100C	A.100 - 1	146	91,3	149	93,1	90,7	4,0
	A.100 - 2	138	86,3	138	86,3		
	A.100 - 3	149	93,1	151	94,4		
A.90C+10FCC	A.90C+10FCC - 1	165	103,1	155	96,9	102,3	2,0
	A.90C+10FCC - 2	154	96,3	176	110,0		
	A.90C+10FCC - 3	173	108,1	159	99,4		
A.80C+20FCC	A.80C+20FCC - 1	173	108,1	176	110,0	107,4	2,9
	A.80C+20FCC - 2	173	108,1	160	100,0		
	A.80C+20FCC - 3	179	111,9	170	106,3		
A.75C+25FCC	A.75C+25FCC - 1	162	101,3	163	101,9	99,1	2,2
	A.75C+25FCC - 2	159	99,4	154	96,3		
	A.75C+25FCC - 3	157	98,1	156	97,5		

Quadro 4.13 . Tensão de rotura à compressão, aos 90 dias de idade, dos provetes de argamassa ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão

90 dias		Carga (KN)/Tensão (MPa)-1		Carga (KN)/Tensão (MPa)-2		TENSÃO (MPa)	Desvio Padrão
A.100C	A.100 - 1	158	98,8	165	103,1	99,3	1,4
	A.100 - 2	160	100,0	155	96,9		
	A.100 - 3	161	100,6	154	96,3		
A.90C+10FCC	A.90C+10FCC - 1	195	121,9	150	93,8	115,0	6,5
	A.90C+10FCC - 2	175	109,4	198	123,8		
	A.90C+10FCC - 3	190	118,8	196	122,5		
A.80C+20FCC	A.80C+20FCC - 1	187	116,9	180	112,5	114,7	1,3
	A.80C+20FCC - 2	180	112,5	183	114,4		
	A.80C+20FCC - 3	193	120,6	178	111,3		
A.75C+25FCC	A.75C+25FCC - 1	173	108,1	173	108,1	104,8	3,0
	A.75C+25FCC - 2	159	99,4	168	105,0		
	A.75C+25FCC - 3	166	103,8	167	104,4		

O gráfico que se apresenta na Figura 4.10 mostra a tensão média de rotura à compressão das argamassas nas idades de hidratação de 7, 28 e 90 dias, enquanto a Figura 4.11 indica a evolução da resistência à compressão que se verificou para as argamassas com o decorrer do tempo até aos 90 dias de idade dos provetes.

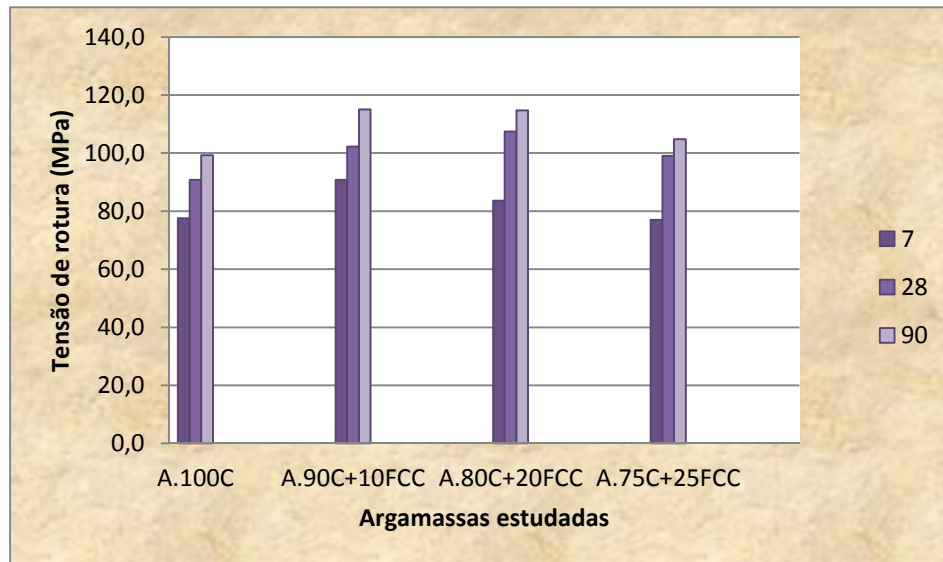


Figura 4.10 – Tensão média de rotura à compressão dos provetes de argamassa nas idades de referência (7, 28 e 90 dias)

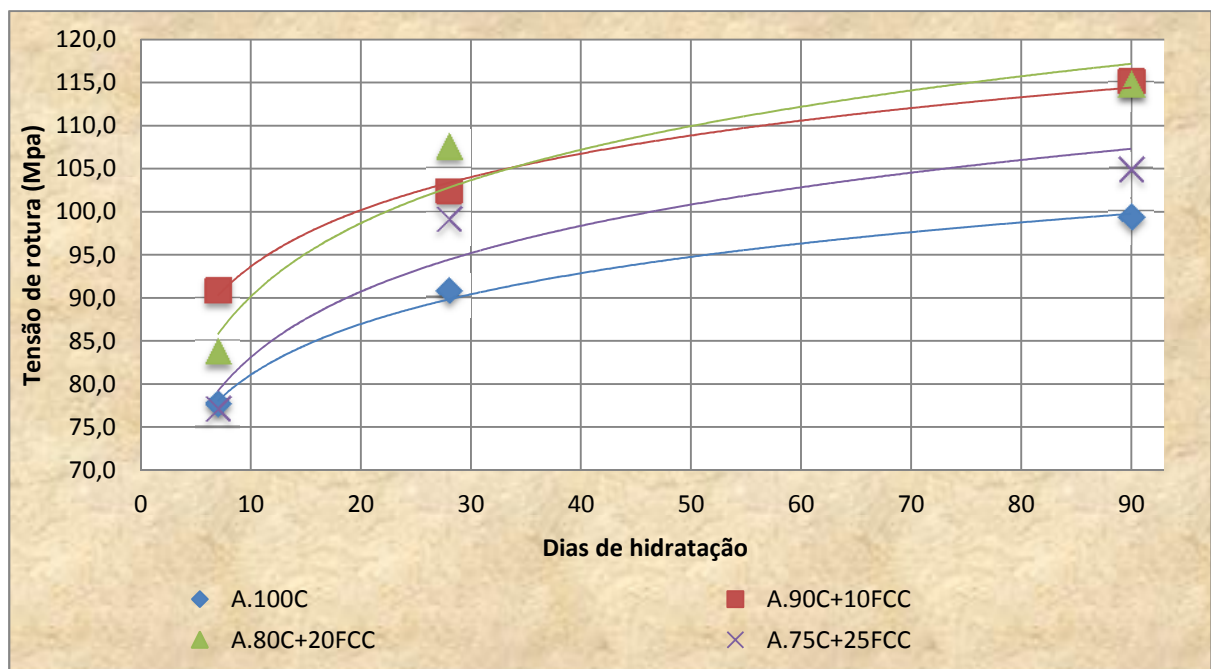


Figura 4.11 - Evolução da tensão média de rotura à compressão dos provetes de argamassa para as diferentes composições de finos.

Da análise dos gráficos representados nas Figura 4.10 e Figura 4.11, constata-se, em todas as composições, um acréscimo da resistência à compressão no decorrer do tempo de hidratação dos provetes, sendo que este acréscimo apresenta uma evolução de tendência assintótica, devido à densificação da matriz cimentícia.

Apresenta-se de seguida, na Figura 4.12, os valores da resistência à compressão das argamassas com diferentes percentagens de incorporação de catalisador exausto de FCC. Para analisar o efeito pozolânico da incorporação de resíduo na resistência à compressão no Quadro 4.14 apresenta-se o Índice de Actividade dos provetes de argamassa com base na resistência à compressão.

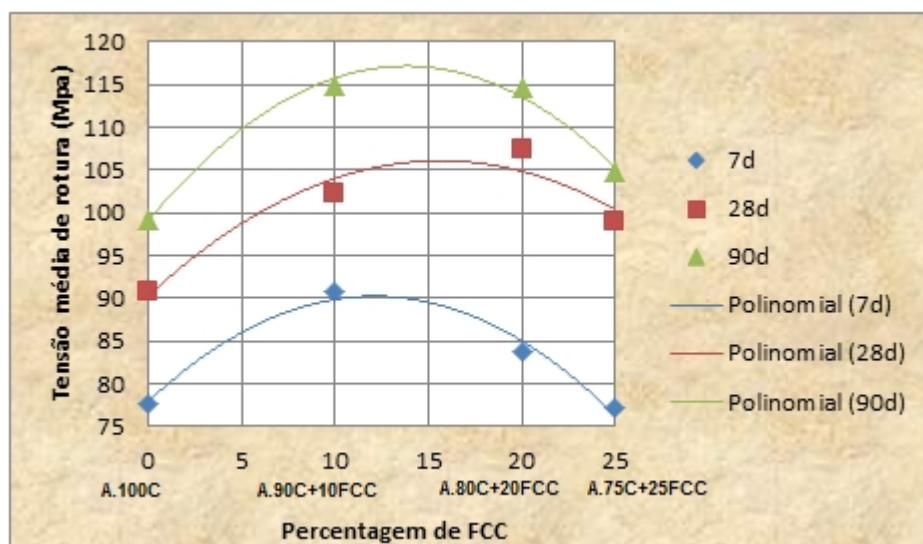


Figura 4.12 - Evoluir da resistência à compressão das argamassas das três idades de ensaio para as diferentes percentagens de FCC

Com a finalidade de aplicar a actividade pozolânica do catalisador exausto de FCC e o seu efeito na resistência, determinou-se, para todas as idades, o Índice de Actividade Pozolânica (IA). Desta forma, considerou-se o Índice de Actividade Pozolânica como a razão entre a resistência de uma dada argamassa com incorporação de catalisador exausto de FCC e a resistência da argamassa de referência, ou seja, sem incorporação de catalisador exausto de FCC, como mostra a seguinte equação:

$$(IA) = \frac{A}{B} \times 100\% \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Sendo:

- A – valor médio da resistência mecânica da argamassa produzida com incorporação de catalisador exausto de FCC;
- B – valor médio da resistência mecânica da argamassa de referência (sem incorporação de catalisador).

Quadro 4.14 – Índice de actividade dos provetes de argamassa com base na resistência à compressão

I.A. (%)			
	7d	28d	90d
A.100C	100,0	100,0	100,0
A.90C+10FCC	116,9	112,7	115,8
A.80C+20FCC	107,8	118,4	115,5
A.75C+25FCC	99,3	109,2	105,6

Através da interpretação da Figura 4.12 conclui-se que, a incorporação de adição de catalisador exausto de FCC nas argamassas que conduz ao valor máximo de resistência à compressão deverá situar-se entre os 10-20% de incorporação, a partir dos 28 dias de hidratação. Este facto é justificável pela actividade pozolânica do catalisador exausto de FCC que consiste na reacção química entre o composto hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, que se forma da hidratação do cimento) com o catalisador exausto de FCC, rico em aluminossilicatos, dando origem a compostos de aluminossilicatos de cálcio hidratados, C-S-H – que são compostos da mesma natureza química dos compostos responsáveis pela resistência mecânica no cimento hidratado. Por este motivo, forma-se uma quantidade adicional de C-S-H que fazem aumentar a resistência mecânica do betão. Sendo que, para além dos 15% de adição de resíduo se observou, a diminuição da resistência mecânica dos BACs preparados. Este resultado pode ser atribuído ao facto do “efeito de diluição” (ou seja, o efeito causado pela substituição parcial do cimento por outro material que deverá reflectir-se na diminuição da sua resistência mecânica), passar a superar o efeito da significativa actividade pozolânica do catalisador exausto de FCC (e que contribui para o aumento da resistência do betão ao qual é adicionado) eventualmente devido à diminuição da concentração

de hidróxido de cálcio disponível para se envolver na reacção pozolânica, que dá origem a quantidades adicionais de compostos C-S-H

Relativamente ao Quadro 4.14 observa-se que ocorreu sempre actividade pozolânica originada pela introdução da adição de catalisador exausto de FCC nas argamassas.

A análise critica conjunta dos resultados apresentados na Figura 4.10 com os resultados obtidos nas velocidades médias dos ultrassons (que a Figura 4.7 apresenta), seria de esperar uma proporcionalidade entre estas duas grandezas, ou seja, para valores mais elevados de resistência à compressão dever-se-ia obter valores maiores de velocidade de propagação, o que nem sempre acontece. Este facto pode ter ocorrido devido a 2 factores: a elevada sensibilidade do aparelho medidor da velocidade, pois uma maior/menor força aplicada nos transdutores e até uma maior/menor dosagem de vaselina, para a aderência dos transdutores às paredes dos provetes, pode ter tido alguma influência nos valores final lidos pelo aparelho, e, também, a presença de microfissuras presentes na estrutura interna dos provetes [19].

Porém, apesar destes factores, considera-se que os resultados obtidos são, na sua generalidade, bastantes satisfatórios.

4.3 Betões

4.3.1 Caracterização no estado fresco

4.3.1.1 Ensaio de espalhamento

O Quadro 4.15 mostra o tempo que T500, as duas medições diametrais e respectiva média no ensaio de espalhamento.

Quadro 4.15 – Tempo T500 e diâmetros alcançados nos betões no ensaio de espalhamento

Mesa espalhamento (mm)				
	T500 (s)	D1	D2	Dmédio
B.100C	4,27	720	730	725
B.90C+10FCC	4,29	750	770	760
B.80C+20FCC	5,03	660	650	655
B.75C+25FCC	3,75	725	765	745

Apresenta-se de seguida estes valores do Quadro 4.15 nas Figura 4.13 e Figura 4.14, valores T500 e diâmetros médios respectivamente, de modo a facilitar a sua interpretação. Nas figuras apresentam-se ainda os limites de aceitação destes valores para que os betões possam ser considerados BAC de acordo com os critérios definidos pela NP EN 206-9 [3].

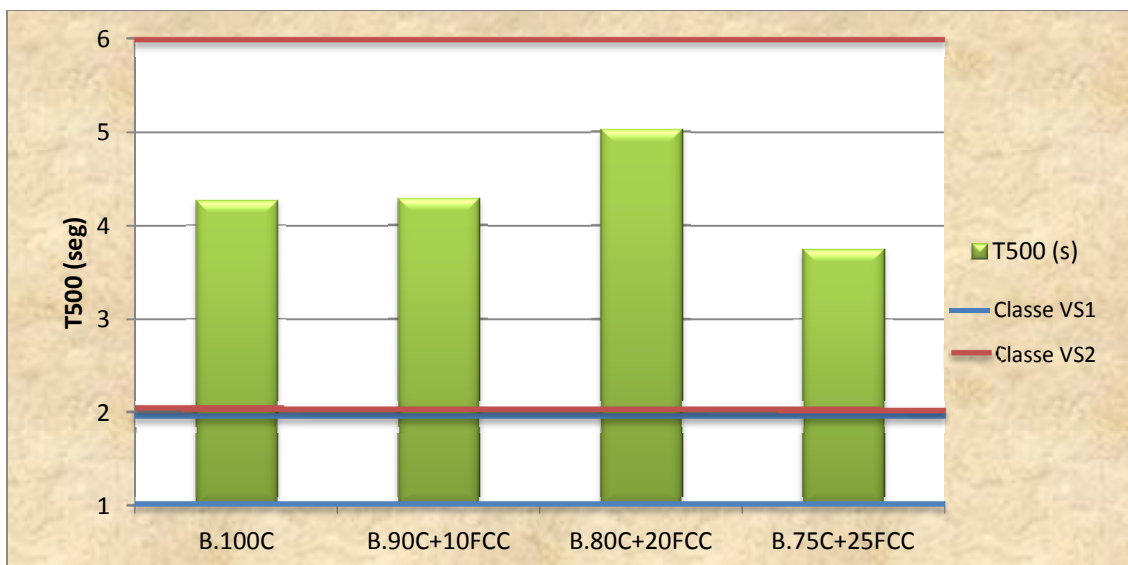


Figura 4.13 – Valores T500, do ensaio de espalhamento, para as diferentes percentagens de catalisador exausto de FCC

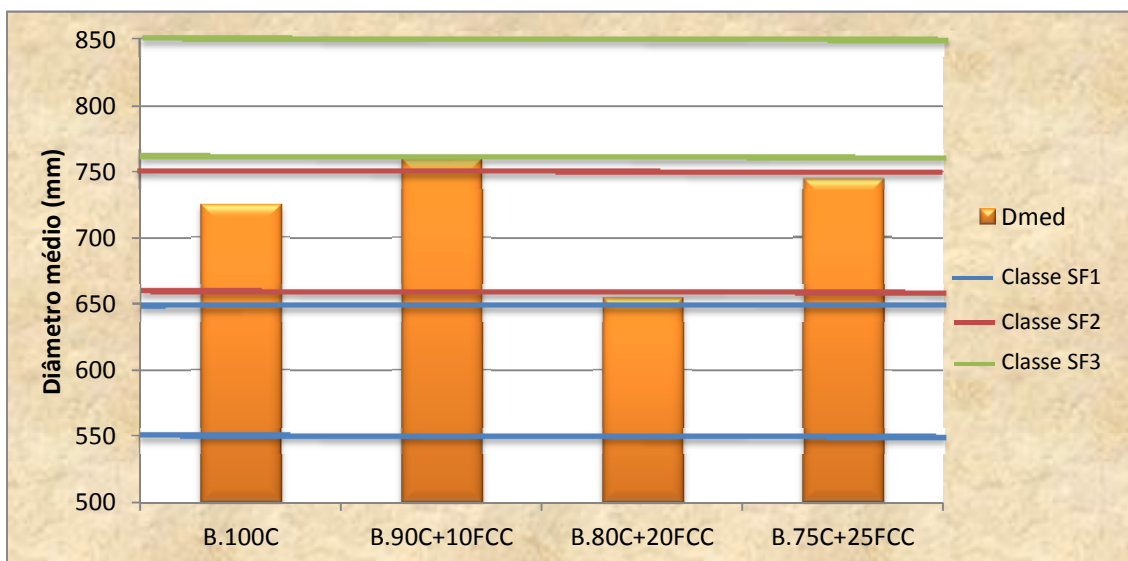


Figura 4.14 – Valores do diâmetro de espalhamento, dos betões, para diferentes incorporações de catalisador exausto de FCC

Dados os parâmetros de composição (V_w/V_p e $S_p/p\%$) dos betões adoptados na preparação das argamassas tinha na sua origem o garantir de uma reologia pretendida, estudada previamente na fase das argamassas, (ver subcapítulo 2.6.1.2), os resultados obtidos na mesa de espalhamento apresentam, como seria espectável, valores para o diâmetro médio e T500 semelhantes para as

diferentes composições estudadas. Se se tivessem adoptado valores constantes de V_w/V_p e $S_p/p\%$ esperar-se-ia obter valores de diâmetro médio inferiores com o incremento de catalisador exausto de FCC na mistura, uma vez que este absorve mais água que o cimento provocando assim menos trabalhabilidade.

Resume-se no Quadro 4.19 as classes de consistência obtidas para este ensaio.

4.3.1.2 Ensaio de fluidez

Apresenta-se de seguida o Quadro 4.16 com os tempos de escoamento no funil V, dos betões preparados, e a apresentação gráfica dos mesmos na Figura 4.15.

Quadro 4.16 – Tempo de escoamento dos betões no ensaio do Funil V

Funil V (seg)	
B.100C	3,87
B.90C+10FCC	4,47
B.80C+20FCC	5,20
B.75C+25FCC	3,84

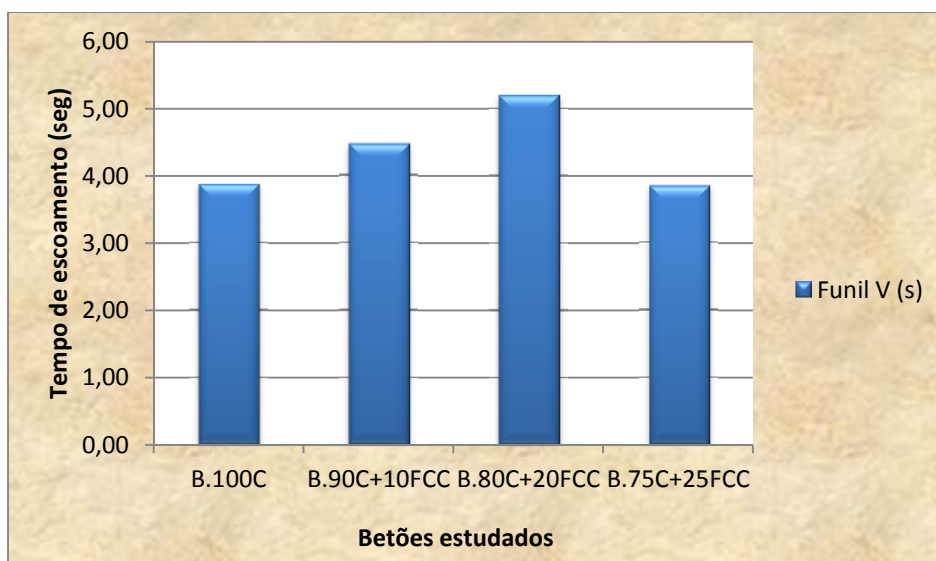


Figura 4.15 – Valores do tempo de escoamento do betão, no ensaio do Funil V, em betões diferentes incorporações de catalisador exausto de FCC

Da análise da Figura 4.15 é possível observar que os tempos de escoamento não sofrem oscilações significativas (3,87 a 5,20 seg) entre si, pois como no ensaio do subcapítulo anterior (4.3.1.1), este ensaio de fluidez está também directamente relacionado com os parâmetros reológicos obtidos na fase das argamassas.

Os valores obtiveram a classe de consistência VF1, para todos os betões, segundo o preconizado pela norma NP EN 206-9 [3] (ver também o Quadro 4.19 onde se resume as classes de consistência de todos os ensaios).

4.3.1.3 Ensaio de Caixa L

Apresenta-se no Quadro 4.17 os resultados obtidos para os valores de H1 e H2, em milímetros, referentes ao ensaio da Caixa L.

Quadro 4.17 – Registo dos valores obtidos no ensaio da Caixa L

Caixa L (mm)									
	H1a	H1b	H1c	H1médio	H2a	H2b	H2c	H2médio	H2/H1
B100C	94	95	94	94,3	80	79	80	79,7	0,84
B90C+10FCC	93	93	93	93,0	80	80	80	80,0	0,86
B80C+20FCC	97	97	98	97,3	79	78	79	78,7	0,81
B75C+25FCC	91	92	92	91,7	81	82	81	81,3	0,89

Os resultados obtidos demonstram uma capacidade de passagem dos betões superior à recomendada pela norma NP EN 206-9 [3] com os valores da razão H2/H1 a alcançarem valores superiores a 0,8. Não foi verificada qualquer tendência de segregação aquando da passagem do agregado pelas barras metálicas.

4.3.1.4 Ensaio de anel J

Apresenta-se na tabela seguinte as medidas obtidas, em milímetros, no ensaio de anel J bem como o valor T500.

Quadro 4.18 – Registo dos valores obtidos no ensaio de Anel J

Anel J (mm)							
	Hx1	Hx2	Hy1	Hy2	H0	PJ2	T500j (seg)
B100C	120	120	117	118	110	9	5,15
B90C+10FCC	125	124	124	123	114	10	4,86
B80C+20FCC	120	119	119	118	109	10	6,88
B75C+25FCC	122	123	121	122	115	7	3,97

Em todos os resultados obtidos no ensaio de anel J verificou-se a condição PJ2 10 (classe de consistência preconizada pela norma em vigor [3]) e também, aquando da realização do ensaio, observou-se uma boa capacidade de passagem dos agregados não se tendo assim verificado segregação dos mesmos.

4.3.2 Enquadramento normativo

Com os dados obtidos no estado fresco enquadram-se, de acordo com o quadro apresentado no subcapítulo 2.7.1, os BACs segundo as seguintes classes de consistência, enquadradas pela norma NP EN 206-9 [3], apresentando os parâmetros obtidos em cada ensaio (P.) e a respectiva classe.

Quadro 4.19 – Classificações de consistência dos BACs preparados

BAC	Espalhamento		Viscosidade				Capacidade de passagem			
			T500		Funil V		Caixa L		Anel J	
	P.	Classe	P.	Classe	P.	Classe	P.	Classe	P.	Classe
B.100C	725	SF2	4,27	VS2	3,87	VF1	0,84	PL2	9	PJ2
B.90C+10FCC	760	SF3	4,29	VS2	4,47	VF1	0,86	PL2	10	PJ2
B.80C+20FCC	655	SF1/SF2	5,03	VS2	5,2	VF1	0,81	PL2	10	PJ2
B.75C+25FCC	745	SF2	3,75	VS2	3,84	VF1	0,89	PL2	7	PJ2

As classes de consistência obtidas verificam que os BACs preparados no laboratório têm uma trabalhabilidade capaz de poderem ser aplicados nas situações mais correntes (SF2: paredes e pilares), com uma boa capacidade de preenchimento e nivelamento (VF1). Os BAC podem também ser aplicados nas estruturas mais correntes (60 a 80 mm) com a classificação que se obteve no ensaio da Caixa L (PL2) e no ensaio de anel J (PJ2). Porém os BACs podem apresentar algumas dificuldades de acabamento superficial e com o tempo de espera entre betonagens devido à classificação obtida no ensaio T500 (VS2).

4.3.3 Caracterização no estado endurecido

4.3.3.1 Velocidade de propagação dos ultrassons

O Quadro 4.20 apresenta as velocidades, média e desvio padrão, obtidos no ensaio de ultrassons em todos os provetes das composições de betão preparados no laboratório

Quadro 4.20 - Velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes de betão ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão (DP)

		7d		28d		90d	
		Velocidade (m/s)	Média (m/s) e DP	Velocidade (m/s)	Média (m/s) e DP	Velocidade (m/s)	Média (m/s) e DP
B.100C	B.100C-1	4310	4523 ± 198	4900	4773 ± 130	4840	4937 ± 159
	B.100C-2	4560		4640		4850	
	B.100C-3	4700		4780		5120	
B.90C+10FCC	B.90C+10FCC-1	4440	4387 ± 274	5050	4973 ± 75	4970	4937 ± 29
	B.90C+10FCC-2	4090		4970		4920	
	B.90C+10FCC-3	4630		4900		4920	
B.80C+20FCC	B.80C+20FCC-1	4520	4547 ± 25	5050	4990 ± 66	4920	4983 ± 57
	B.80C+20FCC-2	4570		5000		5000	
	B.80C+20FCC-3	4550		4920		5030	
B.75C+25FCC	B.75C+25FCC-1	4560	4510 ± 44	4600	4770 ± 161	4970	4923 ± 50
	B.75C+25FCC-2	4490		4920		4870	
	B.75C+25FCC-3	4480		4790		4930	

O gráfico que se apresenta na Figura 4.16 mostra a velocidade média de propagação dos ultrassons nas idades de hidratação dos betões aos 7, 28 e 90 dias, enquanto a Figura 4.17 indica a evolução que se verificou nos provetes de betão com o decorrer do tempo até aos 90 dias de idade dos provetes.

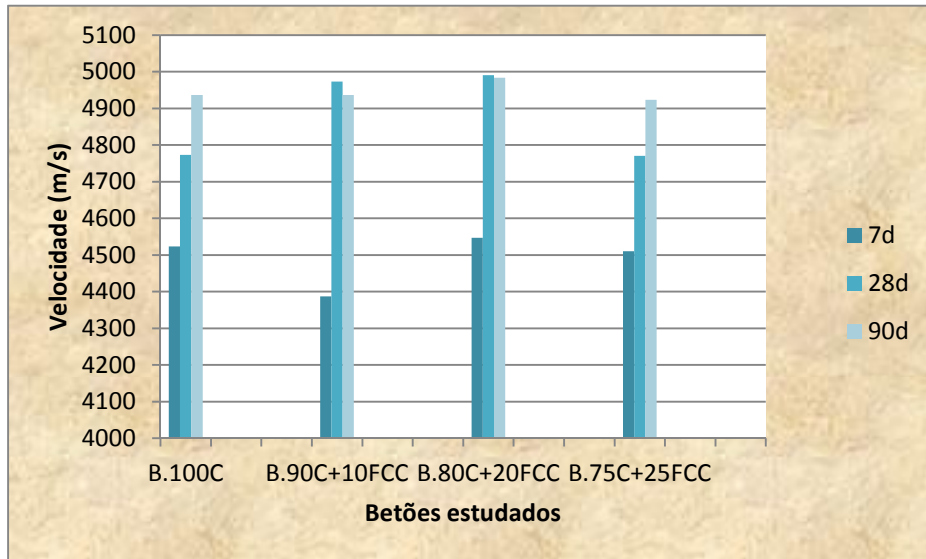


Figura 4.16 - Velocidade média de propagação dos ultrassons dos betões nas idades de referência (7, 28 e 90 dias)

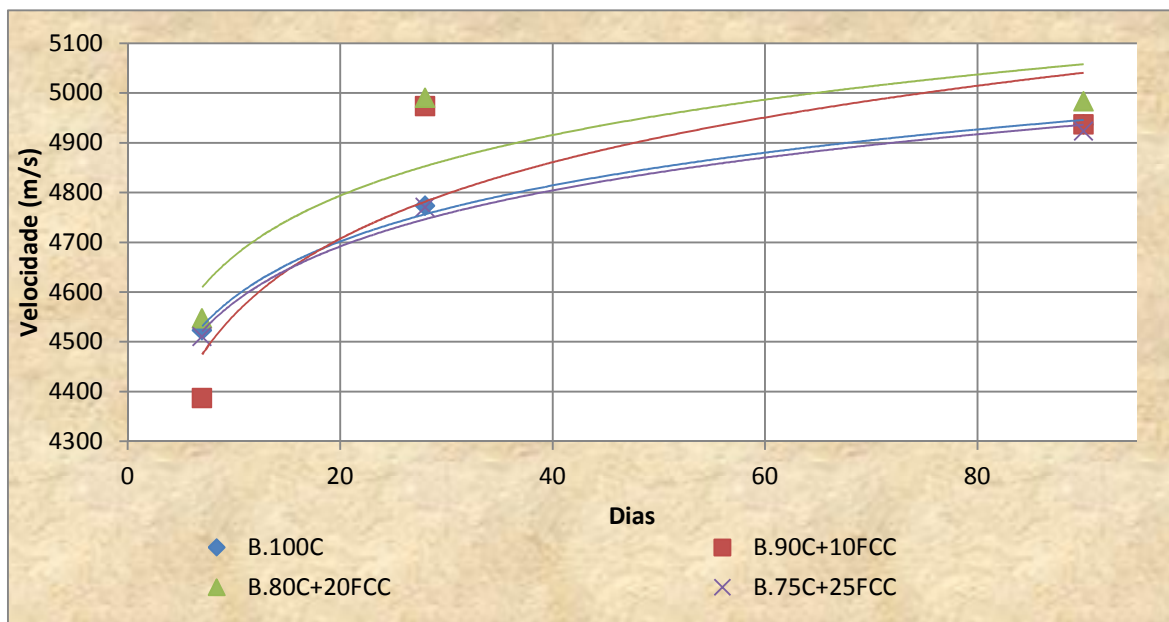


Figura 4.17 - Evolução da velocidade de propagação média dos ultrassons no betão ao longo do tempo de hidratação.

Os resultados obtidos na velocidade de propagação dos ultrassons verificam o andamento verificado nas argamassas (Figura 4.7), com os valores de maior idade de hidratação a serem, geralmente, superiores aos de idade inferior. Esporadicamente verifica-se que a velocidade de propagação dos 28 para os 90 dias se manteve constante (pois os valores enquadram-se dentro dos desvios padrões) que pode ser explicado devido aos erros acidentais de operação e manuseamento dos materiais, ou existência de fissuras ou micro fissuras nos provetes de 90 dias fazendo assim que velocidade de propagação se mantivesse praticamente igual (*Ver também subcapítulo referente à velocidade dos ultrassons registados nos provetes de argamassa, 4.2.2.1*).

Durante a campanha experimental recolheu-se a componente longitudinal das formas de onda. No entanto, o tratamento destes resultados sai fora do âmbito desta dissertação. Contudo as apresentam-se duas formas de onda que se obtiveram no ANEXO D - Ondas longitudinais obtidas no osciloscópio.

4.3.3.2 Resistência à compressão

Os três quadros que se seguem (*Quadro 4.21 a Quadro 4.23*) apresentam as características geométricas, os valores de resistência à compressão (carga e respectiva tensão de rotura), a média e desvio padrão das resistências à compressão para as idades de hidratação dos provetes de 7, 28 e 90 dias.

Quadro 4.21 - Tensão de rotura à compressão, aos 7 dias de idade, dos provetes de betão ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão

7 dias		Dimensões (mm)			Secção	Carga de Rotura	Tensão de Rotura	Média	Desvio Padrão
		x	y	z	(mm ²)	(KN)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
B.100C	B.100C-1	151	150	150	22650	1503	66,4	65,8	2,16
	B.100C-2	149	150	150	22350	1513	67,7		
	B.100C-3	150	150	150	22500	1428	63,5		
B.90C+10FCC	B.90C+10FCC-1	149	150	150	22350	1676	75,0	75,3	0,54
	B.90C+10FCC-2	149	150	150	22350	1678	75,1		
	B.90C+10FCC-3	149	150	150	22350	1698	76,0		
B.80C+20FCC	B.80C+20FCC-1	150	150	150	22500	1530	68,0	68,2	0,74
	B.80C+20FCC-2	150	150	150	22500	1522	67,6		
	B.80C+20FCC-3	150	150	150	22500	1554	69,1		
B.75C+25FCC	B.75C+25FCC-1	150	151	150	22650	1342	59,2	59,8	0,85
	B.75C+25FCC-2	150	150	150	22500	1367	60,8		
	B.75C+25FCC-3	150	150	150	22500	1335	59,3		

Quadro 4.22 - Tensão de rotura à compressão, aos 28 dias de idade, dos provetes de betão ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão

28 dias		Dimensões (mm)			Secção	Carga de Rotura	Tensão de Rotura	Média	Desvio Padrão
		x	y	z	(mm ²)	(KN)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
B.100C	B.100C-1	150	150	150	22500	1692	75,2	73,6	1,70
	B.100C-2	150	150	150	22500	1616	71,8		
	B.100C-3	150	150	150	22500	1662	73,9		
B.90C+10FCC	B.90C+10FCC-1	150	150	150	22500	1874	83,3	85,9	2,90
	B.90C+10FCC-2	150	150	150	22500	1921	85,4		
	B.90C+10FCC-3	150	150	150	22500	2003	89,0		
B.80C+20FCC	B.80C+20FCC-1	150	150	150	22500	1841	81,8	83,3	1,33
	B.80C+20FCC-2	150	150	150	22500	1885	83,8		
	B.80C+20FCC-3	150	150	150	22500	1898	84,4		
B.75C+25FCC	B.75C+25FCC-1	150	150	150	22500	1672	74,3	74,3	0,03
	B.75C+25FCC-2	150	150	150	22500	1672	74,3		
	B.75C+25FCC-3	150	150	150	22500	1673	74,4		

Quadro 4.23 - Tensão de rotura à compressão, aos 90 dias de idade, dos provetes de betão ensaiados mais a respectiva média e desvio padrão

90 dias		Dimensões (mm)			Secção	Carga de Rotura	Tensão de Rotura	Média	Desvio Padrão
		x	y	z	(mm ²)	(KN)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
B.100C	B.100C-1	150	150	150	22500	1737	77,2	80,9	3,91
	B.100C-2	151	150	150	22650	1821	80,4		
	B.100C-3	150	150	150	22500	1912	85,0		
B.90C+10FCC	B.90C+10FCC-1	149	150	150	22350	2051	91,8	90,1	3,08
	B.90C+10FCC-2	150	150	150	22500	1948	86,6		
	B.90C+10FCC-3	149	150	150	22350	2057	92,0		
B.80C+20FCC	B.80C+20FCC-1	151	150	150	22650	1971	87,0	87,7	1,49
	B.80C+20FCC-2	150	150	150	22500	1949	86,6		
	B.80C+20FCC-3	150	150	150	22500	2011	89,4		
B.75C+25FCC	B.75C+25FCC-1	151	150	150	22650	1869	82,5	81,8	2,73
	B.75C+25FCC-2	150	150	150	22500	1893	84,1		
	B.75C+25FCC-3	151	150	150	22650	1785	78,8		

O gráfico que se apresenta na Figura 4.18 mostra a tensão média de rotura à compressão nas idades de hidratação dos provetes aos 7, 28 e 90 dias, enquanto a Figura 4.19 indica a evolução assintótica da resistência à compressão que se verificou nos provetes de betão com o decorrer do tempo até aos 90 dias de idade dos provetes.

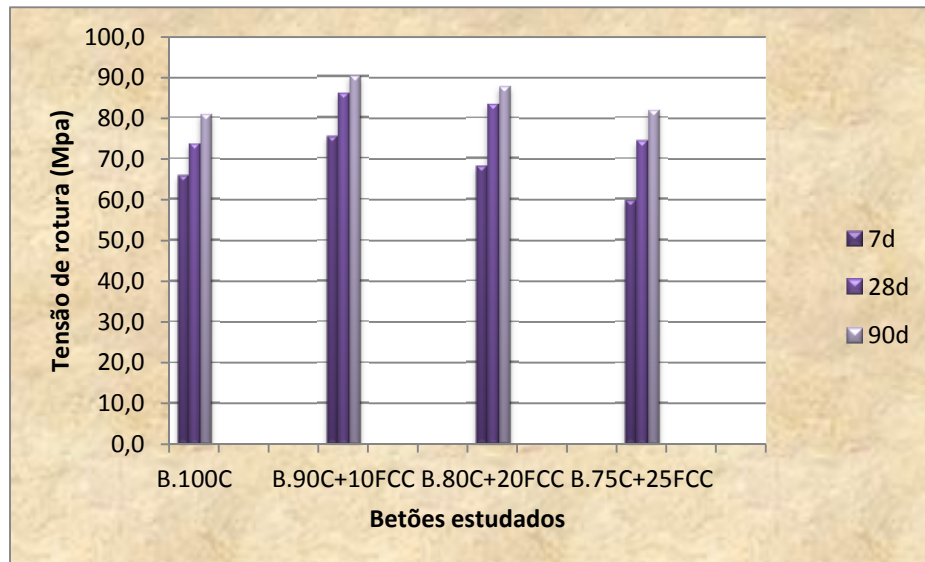


Figura 4.18 – Tensão média de rotura à compressão dos provetes de argamassa nas idades de referência (7, 28 e 90 dias)

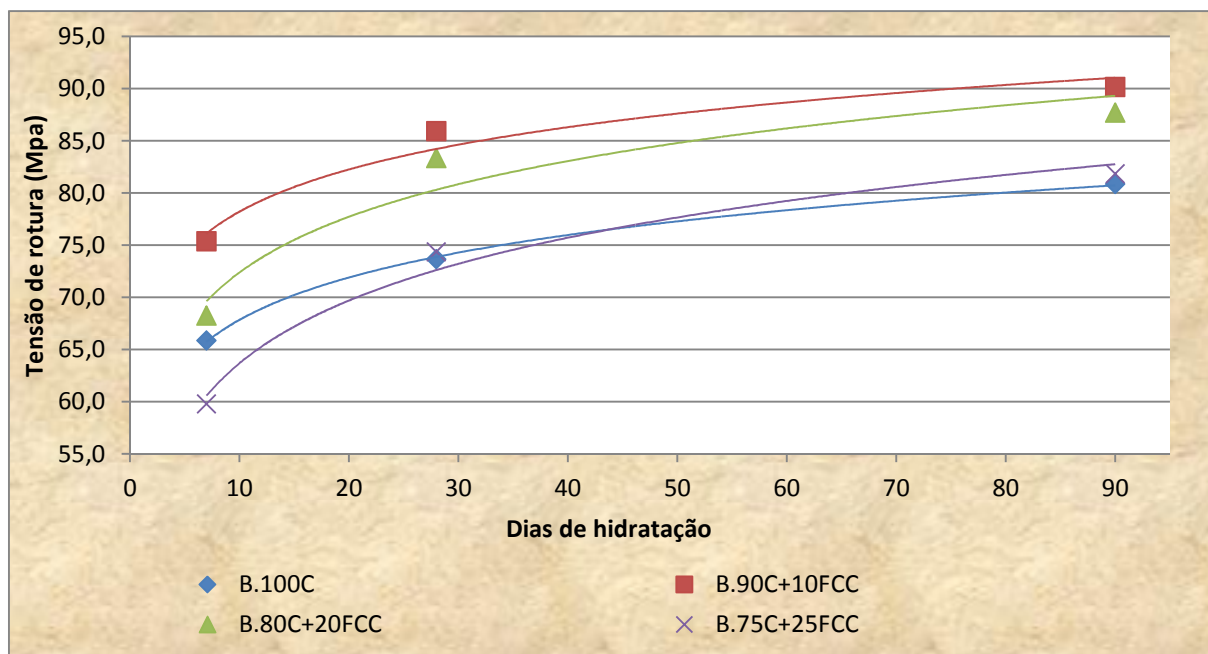


Figura 4.19 – Evolução da tensão média de rotura à compressão dos provetes de betão para as diferentes composições de finos.

Da análise das Figura 4.18 e Figura 4.19 verificou-se o aumento da resistência, com a idade de hidratação, de todos os betões, sendo que este aumento aparenta uma evolução assintótica, devido à densificação da matriz cimentícia, tal como aconteceu para as argamassas (ver subcapítulo 4.2.2.3).

Apresenta-se de seguida, na Figura 4.20, os valores da resistência à compressão para diferentes percentagens de incorporação de catalisador exausto de FCC, e o Quadro 4.24 com o Índice de Actividade dos betões com base na resistência à compressão. (ver mais informações sobre o Índice de Actividade no subcapítulo, 4.2.2.3)

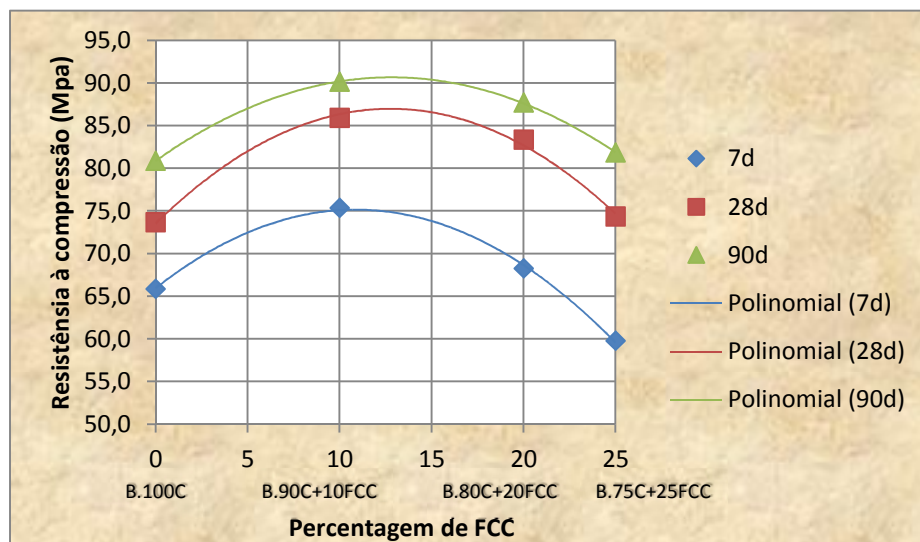


Figura 4.20 - Evoluir da resistência à compressão dos betões das três idades de ensaio para as diferentes percentagens de catalisador exausto de FCC

Quadro 4.24 - Índice de actividade dos provetes de betão com base na resistência à compressão

	I.A. (%)		
	7d	28d	90d
B.100C	100,0	100,0	100,0
B.90C+10FCC	114,4	116,7	111,5
B.80C+20FCC	103,6	113,2	108,4
B.75C+25FCC	90,8	100,9	101,2

Como seria de esperar o andamento obtido para a resistência à compressão nos betões é semelhante ao verificado para as argamassas, com a incorporação de adição de catalisador

exausto de FCC, que conduz ao valor máximo de resistência à compressão, a situar-se entre os 10-15% de incorporação de catalisador exausto de FCC no betão. Os valores do Quadro 4.24, Índice de Actividade, também se aproximam dos valores do Índice de Actividade verificado nas argamassas (*ver subcapítulo 4.2.2.3*), onde se verifica, para todas as idades de hidratação e diferentes incorporações de catalisador, a ocorrência de actividade pozolânica.

4.3.3.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade

Apresenta-se nos quadros seguintes, Quadro 4.25 a Quadro 4.28, os valores correspondentes ao peso e diferenças de peso relativamente ao peso inicial, às alturas de água, à absorção, ao coeficiente de capilaridade (K_c) e ao coeficiente de capilaridade inicial para as primeiras 6 horas de ensaio ($K_{c_{6h}}$) verificados nos betões em todas as horas de medição (0, 3, 6, 24 e 72 horas) realizado a partir do 28º dia de hidratação.

Quadro 4.25 – Registo dos dados (peso e altura de água), absorção, coeficiente de capilaridade e coeficiente de capilaridade das primeiras 6 horas de ensaio da composição de finos B.100C

B.100C											
Hora s	Peso (g)	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	hmédio (mm)	Área (mm ²)	Mi-M0 (g)	Absorção (g/mm ²)	Kc [Kg/(m ² .h ^{0.5})]	Kc _{6h} [Kg/(m ² .h ^{0.5})]
0	12724	0	0	0	0	0	17671,5	0	0	0,230	0,316
3	12737	15	9	15	10	12,3	17671,5	13	0,000736		
6	12741	17	15	15	19	16,5	17671,5	17	0,000962		
24	12750	22	28	31	24	26,3	17671,5	26	0,001471		
72	12765	34	35	31	31	32,8	17671,5	41	0,002320		

Quadro 4.26 - Registo dos dados (peso e altura de água), absorção, coeficiente de capilaridade e coeficiente de capilaridade das primeiras 6 horas de ensaio da composição de finos B.90C+10FCC

B.90C+10FCC											
Hora s	Peso (g)	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	hmédio (mm)	Área (mm ²)	Mi-M0 (g)	Absorção (g/mm ²)	Kc [Kg/(m ² .h ^{0.5})]	Kc _{6h} [Kg/(m ² .h ^{0.5})]
0	12597	0,0	0,0	0,0	0,0	0	17671,5	0	0	0,226	0,237
3	12609	1,5	1,4	1,1	1,5	13,8	17671,5	12	0,000679		
6	12612	1,7	1,8	1,6	1,7	17,0	17671,5	15	0,000849		
24	12622	2,2	2,6	2,1	2,4	23,3	17671,5	25	0,001415		
72	12636	2,9	2,5	2,5	2,6	26,3	17671,5	39	0,002207		

Quadro 4.27 - Registo dos dados (peso e altura de água), absorção, coeficiente de capilaridade e coeficiente de capilaridade das primeiras 6 horas de ensaio da composição de finos B.80C+20FCC

B.80C+20FCC											
Hora	Peso (g)	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	hmédio (mm)	Área (mm²)	Mi-M0 (g)	Absorção (g/mm²)	Kc [Kg/(m².h^{0.5})]	KC_{6h} [Kg/(m².h^{0.5})]
0	12275	0	0	0	0	0	17671,5	0	0	0,241	0,316
3	12288	20	15	15	16	16,5	17671,5	13	0,000736		
6	12292	22	19	21	20	20,5	17671,5	17	0,000962		
24	12303	20	19	23	23	21,3	17671,5	28	0,001584		
72	12317	25	24	24	25	24,5	17671,5	42	0,002377		

Quadro 4.28 - Registo dos dados (peso e altura de água), absorção, coeficiente de capilaridade e coeficiente de capilaridade das primeiras 6 horas de ensaio da composição de finos B.75C+25FCC

B.75C+25FCC											
Hora	Peso (g)	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	hmédio (mm)	Área (mm²)	Mi-M0 (g)	Absorção (g/mm²)	Kc [Kg/(m².h^{0.5})]	KC_{6h} [Kg/(m².h^{0.5})]
0	12089	0	0	0	0	0	17671,5	0	0	0,308	0,394
3	12110	15	12	11	20	14,5	17671,5	21	0,001188		
6	12115	19	23	24	22	22	17671,5	26	0,001471		
24	12129	28	25	23	22	24,5	17671,5	40	0,002264		
72	12147	32	24	25	37	29,5	17671,5	58	0,003282		

A Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23 apresentam, respectivamente, a evolução da absorção de água nos provetes de ensaio ao longo das primeiras 72 horas de ensaio, as rectas para obtenção dos coeficientes de capilaridades e a altura média de água registadas nos provetes nas horas de ensaio (3, 6, 24 e 72 horas).

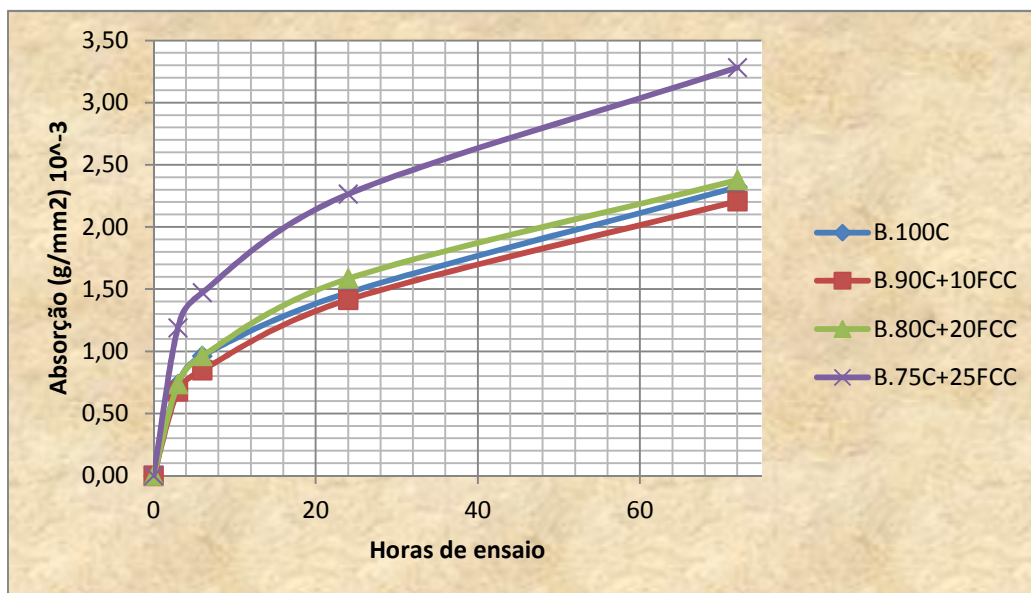


Figura 4.21 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo.

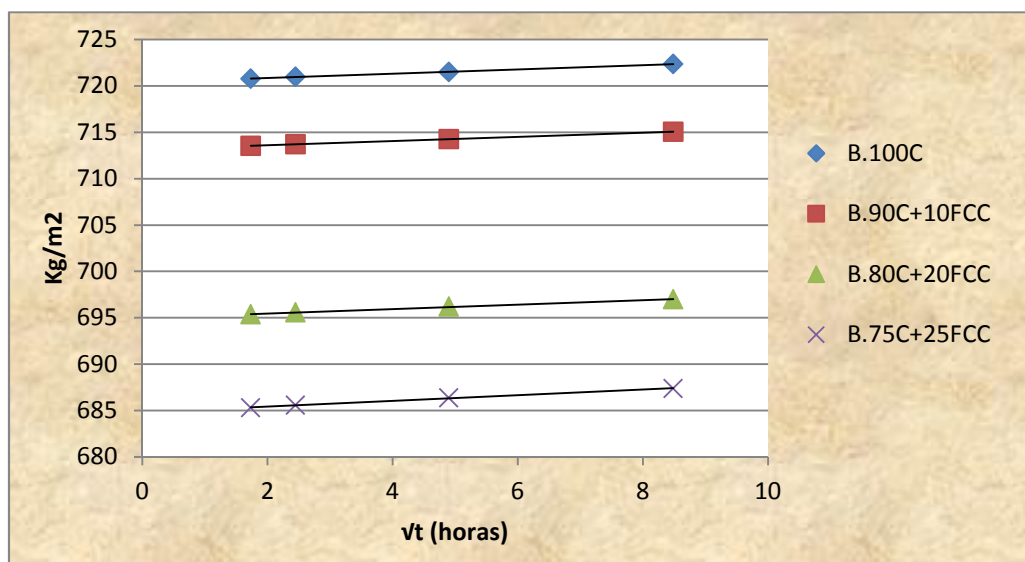


Figura 4.22 – Ajuste das rectas que dão origem aos coeficientes de absorção capilar, através do seu declive.



Figura 4.23 – Altura média de água medida ao longo de 4 geratrizes nos provetes de betão no ensaio de absorção por capilaridade.

No que diz respeito à evolução da absorção de água nos betões com diferentes teores de adição de catalisador exausto de FCC, os resultados da Figura 4.21 e os valores dos coeficientes de absorção capilar, retirados da Figura 4.22, apresentam valores muito semelhantes para 0, 10 e 20% de adição. Porém a absorção de água verificada no provete com 25% de adição de catalisador exausto de FCC, sofre um aumento significativo de cerca de 38%, relativamente aos restantes. Era expectável que os resultados apresentassem um valor superior de absorção à medida que se incrementa o catalisador exausto de FCC, tal como aconteceu no ensaio da absorção por imersão, (*ver subcapítulo 4.3.3.4*), mas o resultado que se faz apresentar poderá indiciar alguma ocorrência de um erro aleatório aquando da fase laboratorial, por exemplo, na pesagem inicial do betão com 25% de substituição (B.75C + 25FCC).

Relativamente aos coeficientes de capilaridade para as primeiras 6 horas de ensaio ($K_{c_{6h}}$) verifica-se, para todos os provetes, que é superior ao coeficiente correspondente para as 72 horas de ensaio, isto é, a taxa de absorção de capilaridade dos betões é superior nos primeiros dias de hidratação.

Por não haver moldes suficientes, este foi o único ensaio onde só se realizou testes a um único provete por composição, impedindo assim que se realizasse uma média convergindo assim para valores mais ajustáveis como aconteceu nos outros ensaios.

Como foi referido, no subcapítulo 3.6.4.3, paralelamente às pesagens mediu-se, como informação complementar, as alturas atingidas pela água em 4 geratrizes desenhadas no provete. Como era de esperar as alturas de água subiram ao longo do tempo, como é possível observar na Figura 4.23.

4.3.3.4 Ensaio de absorção de água por imersão

Apresenta-se no Quadro 4.29 a massa dos provetes saturados (m_1), a massa hidrostática (m_2), a massa constante do provete a seco (m_3), a absorção por imersão e a percentagem de variação de absorção que se verificou para diferentes teores de incorporação do catalisador exausto de FCC na composição dos BACs.

Quadro 4.29 – Registo das massas m_1, m_2 e m_3 , absorção por imersão e variação de percentagem com incorporação de catalisador exausto de FCC

Betão	Provete	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	A_i (%) / média	Variação (%)
B.100C	B.100C-1	2408	1409	2253,6	15,5	15,1
	B.100C-2	2432	1434	2290,8	14,1	
	B.100C-3	2397	1401	2241,7	15,6	
B.90C+10FCC	B.90C+10FCC-1	2433	1432	2301,6	13,1	13,4
	B.90C+10FCC-2	2439	1435	2307,0	13,1	
	B.90C+10FCC-3	2415	1415	2276,9	13,8	
B.80C+20FCC	B.80C+20FCC-1	2373	1366	2221,5	15,0	15,2
	B.80C+20FCC-2	2381	1371	2227,1	15,2	
	B.80C+20FCC-3	2380	1371	2226,5	15,2	
B.75C+25FCC	B.75C+25FCC-1	2346	1339	2175,0	17,0	16,9
	B.75C+25FCC-2	2355	1344	2184,4	16,9	
	B.75C+25FCC-3	2345	1338	2175,7	16,8	

A Figura 4.24 e Figura 4.25, apresentam respectivamente a representação das absorções de água médias verificadas nos provetes de betão e a posterior perda de água dos mesmos na estufa até atingirem a massa constante.

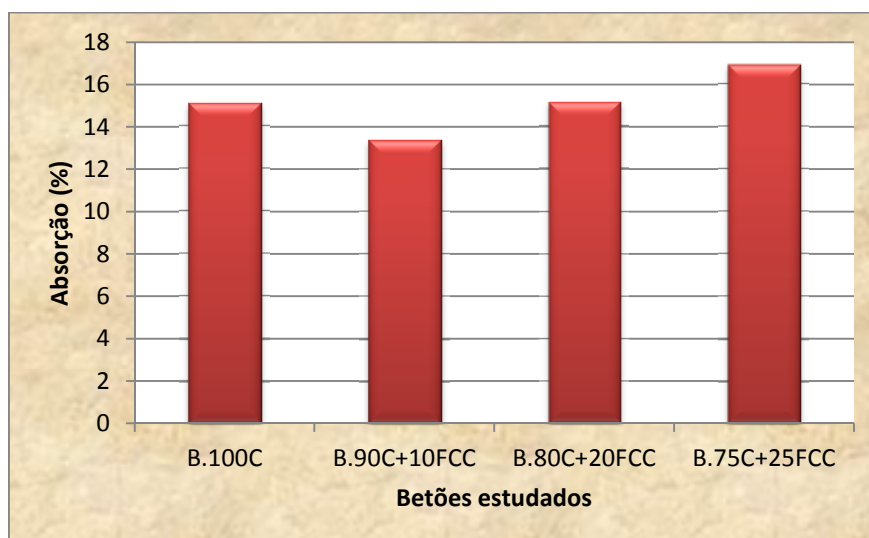


Figura 4.24 - Percentagem de absorção por imersão de água das diferentes incorporações de catalisador exausto de FCC

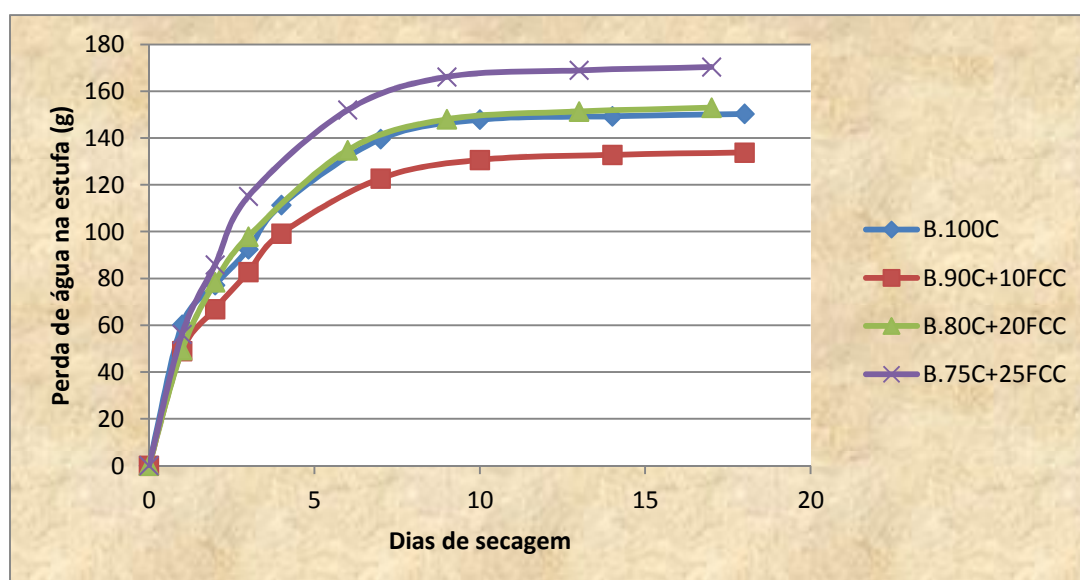


Figura 4.25 - Perda de água pelos provetes, na estufa, no ensaio de absorção por imersão, ao longo do tempo, até se atingir massa constante.

Neste ensaio de absorção por imersão, avalia-se a porosidade aberta do betão em estudo, complementando a informação sobre a porosidade capilar obtida com o ensaio da absorção por capilaridade. Verifica-se que, apesar dum decréscimo de pouco mais de 11% de absorção de água com a introdução na composição do BAC de 10% de adição de catalisador exausto de FCC

relativamente ao betão de referência, a absorção de água neste ensaio aumenta à medida que incrementamos a incorporação de catalisador exausto de FCC como podemos ver pela Figura 4.24.

A figura abaixo, Figura 4.26, evidencia a correlação existente entre os valores obtidos pela absorção de água e os valores da resistência à compressão (*ver subcapítulo 4.3.3.2*) nos betões com incorporação de catalisador exausto de FCC.

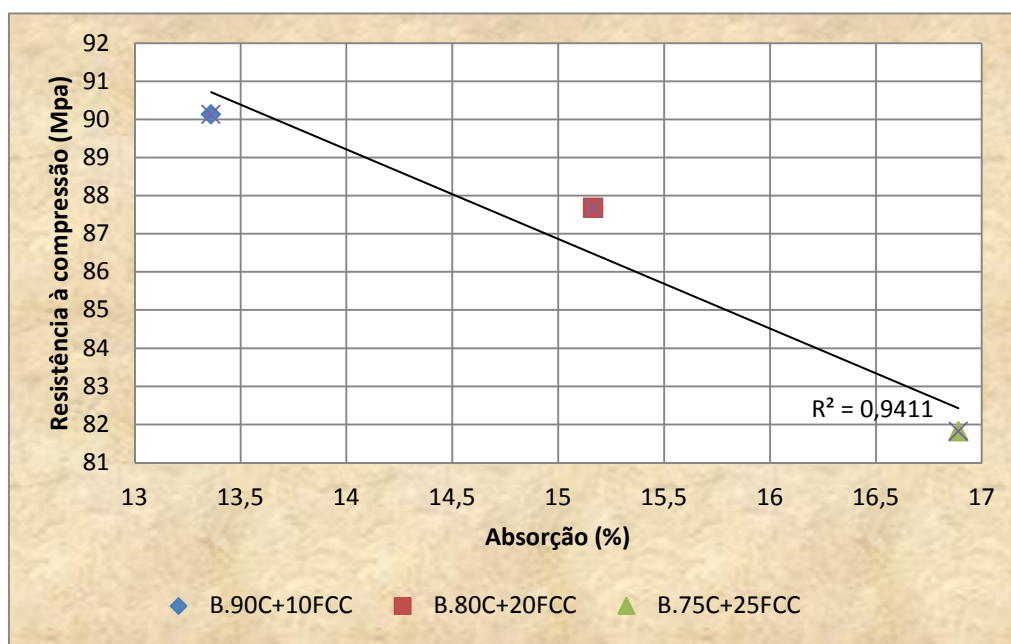


Figura 4.26 – Correlação linear dos betões entre os resultados de absorção por imersão e a resistência à compressão aos 90 dias de hidratação, nos BAC com incorporação de catalisador exausto de FCC.

Tal como nos resultados do ensaio de capilaridade, verifica-se que o B.75C+25FCC é o mais poroso e que existe uma correlação linear entre a porosidade dos betões e os valores alcançados da resistência à compressão, nas composições com incorporação de catalisador exausto de FCC, como é perceptível pela Figura 4.26.

4.3.3.5 Ensaio de análise dimensional

Nos Quadro 4.30 a Quadro 4.33 apresentam-se as medições que se obtiveram em dois provetes de cada composição de betão, a média e respectiva retracção/expansão que se observou do ensaio de análise dimensional.

Quadro 4.30 – Valores das medições, e respectiva média, do ensaio de análise dimensional realizadas nos dois provetes de betão B.100C

	B.100C-1		B.100C-2		B.100C-médio	
Dia	Medição (mm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	Medição (mm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	Média (mm)	$\epsilon \times 10^{-3}$
6	0,005	0,017	0,020	0,067	0,013	0,042
7	0,028	0,093	0,029	0,097	0,029	0,095
10	0,035	0,117	0,048	0,160	0,042	0,138
13	0,040	0,133	0,055	0,183	0,048	0,158
20	0,050	0,167	0,070	0,233	0,060	0,200
22	0,060	0,200	0,075	0,250	0,068	0,225
31	0,125	0,417	0,150	0,500	0,138	0,458
37	0,130	0,433	0,165	0,550	0,148	0,492
51	0,135	0,450	0,170	0,567	0,153	0,508
79	0,160	0,533	0,180	0,600	0,170	0,567
91	0,175	0,583	0,180	0,600	0,178	0,592

Quadro 4.31 - Valores das medições, e respectiva média, do ensaio de análise dimensional realizadas nos dois provetes de betão B.90C+10FCC

	B.90C+10FCC-1		B.90C+10FCC-2		B.90C+10FCC-médio	
Dia	Medição (mm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	Medição (mm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	Média (mm)	$\epsilon \times 10^{-3}$
3	0,020	0,067	0,025	0,083	0,023	0,075
6	0,040	0,133	0,035	0,117	0,038	0,125
7	0,048	0,160	0,040	0,133	0,044	0,147
10	0,065	0,217	0,068	0,227	0,067	0,222
13	0,068	0,227	0,076	0,253	0,072	0,240
20	0,080	0,267	0,090	0,300	0,085	0,283
22	0,089	0,297	0,095	0,317	0,092	0,307
31	0,170	0,567	0,170	0,567	0,170	0,567
37	0,170	0,567	0,171	0,570	0,171	0,568
51	0,175	0,583	0,190	0,633	0,183	0,608
79	0,180	0,600	0,195	0,650	0,188	0,625
91	0,200	0,667	0,195	0,650	0,198	0,658

Quadro 4.32 - Valores das medições, e respectiva média, do ensaio de análise dimensional realizadas nos dois provetes de betão B.80C+20FCC

Dia	B.80C+20FCC-1		B.80C+20FCC-2		B.80C+20FCC-médio	
	Medição (mm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$	Medição (mm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$	Média (mm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$
5	0,017	0,057	0,023	0,077	0,020	0,067
6	0,040	0,133	0,035	0,117	0,038	0,125
9	0,062	0,207	0,075	0,250	0,069	0,228
12	0,080	0,267	0,087	0,290	0,084	0,278
19	0,092	0,307	0,115	0,383	0,104	0,345
21	0,097	0,323	0,120	0,400	0,109	0,362
30	0,187	0,623	0,195	0,650	0,191	0,637
36	0,189	0,630	0,200	0,667	0,195	0,648
50	0,197	0,657	0,220	0,733	0,209	0,695
78	0,222	0,740	0,235	0,783	0,229	0,762
90	0,237	0,790	0,235	0,783	0,236	0,787

Quadro 4.33 - Valores das medições, e respectiva média, do ensaio de análise dimensional realizadas nos dois provetes de betão B.75C+25FCC

Dia	B.75C+25FCC-1		B.75C+25FCC-2		B.75C+25FCC-médio	
	Medição (mm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$	Medição (mm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$	Média (mm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$
5	0,020	0,067	0,025	0,083	0,023	0,075
6	0,035	0,117	0,034	0,113	0,035	0,115
9	0,060	0,200	0,067	0,223	0,064	0,212
12	0,070	0,233	0,077	0,257	0,074	0,245
19	0,090	0,300	0,105	0,350	0,098	0,325
21	0,100	0,333	0,108	0,360	0,104	0,347
30	0,190	0,633	0,185	0,617	0,188	0,625
36	0,195	0,650	0,185	0,617	0,190	0,633
50	0,215	0,717	0,200	0,667	0,208	0,692
78	0,230	0,767	0,215	0,717	0,223	0,742
90	0,230	0,767	0,230	0,767	0,230	0,767

O gráfico da Figura 4.27, mostra a evolução da retracção (médio) que se verificou nos provetes de ensaio para todas as composições.

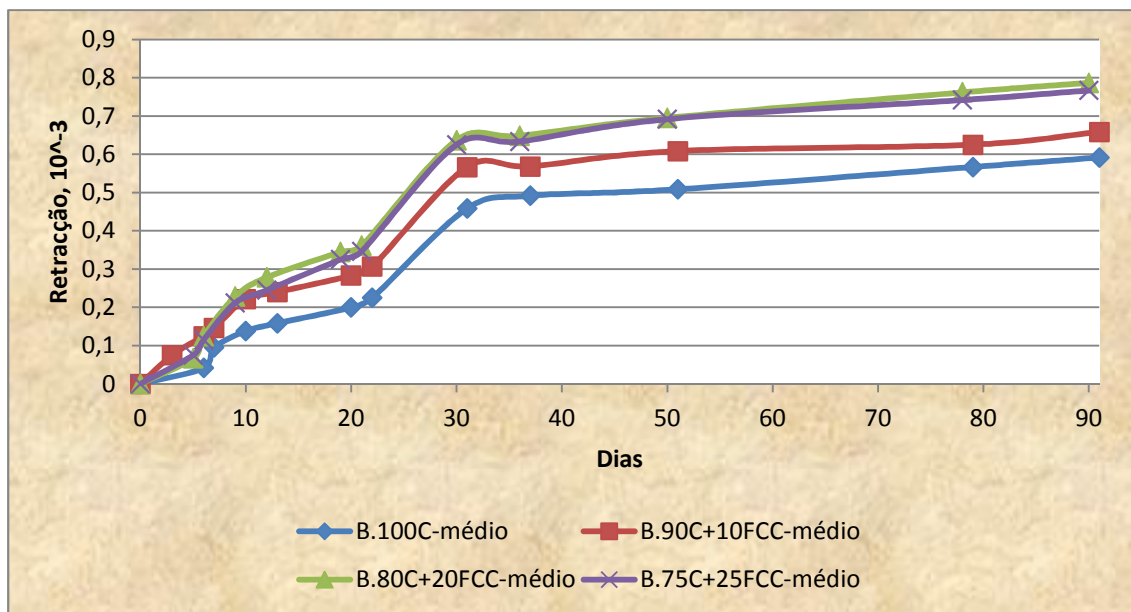


Figura 4.27 – Evolução da dimensão dos provetes de betão ao longo de 90 dias das diferentes composições de incorporação de catalisador exausto de FCC

Os betões preparados em laboratório evidenciaram uma taxa de crescimento dos valores de retracção que, como é possível observar na Figura 4.27, diminuiu ao longo da idade de hidratação. A incorporação de adição de catalisador exausto de FCC fez também aumentar os valores de retracção, com os betões de 20 e 25% a apresentarem maiores retracções relativamente ao betão preparado com 10% de resíduo e do betão de referência.

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste último capítulo apresentam-se as conclusões gerais da dissertação tendo por base as conclusões parciais que se obtiveram no capítulo anterior. São ainda indicadas propostas para trabalhos futuros de forma a darem um contributo ao desenvolvimento do tema desta dissertação.

5.1 Conclusões gerais

Com o término desta dissertação, é espectável ter-se contribuído para o alargamento do conhecimento de BACs relativamente a novas adições, no caso concreto de catalisador exausto da indústria petroquímica. Através dos ensaios que se realizaram, e do sucesso dos resultados que se obtiveram, espera-se ter fornecido uma base para a realização duma actualização dos documentos técnicos, nomeadamente a norma NP EN 206-1 [43], que rege, entre outros, o uso das adições enquanto elemento constituinte de ligante à base de cimento.

O método aplicado (descrito no subcapítulo 2.6), que inclui uma fase inicial de preparação de argamassa e uma segunda fase de preparação de BACs, mostrou-se ser adequado para a realização da actividade laboratorial, conseguindo-se deste modo realizar todas as tarefas inicialmente propostas, nomeadamente averiguar a possibilidade de incorporar catalisador exausto de FCC como adição dos BACs.

No cômputo geral da análise e observação dos resultados obtidos, verifica-se um grande potencial do uso de catalisador exausto de FCC enquanto adição dos BACs, pois não só a sua incorporação fez aumentar a sua resistência mecânica como foi ainda possível observar nos BACs uma grande aptidão de trabalhabilidade sem ocorrências de exsudação ou segregação do material.

A viabilidade da incorporação do catalisador estudado dá ainda a possibilidade de aproveitar um resíduo da indústria petroquímica e diminuir a necessidade de recorrer à extracção de recursos naturais para a fabricação de clínquer/cimento.

Em sintetize, apresenta-se de seguida as conclusões, e algumas notas, que se consideram ser as mais relevantes no que diz respeito a todo o decurso da actividade levada a cabo no laboratório:

- Fase de Argamassas:
 - O método de iteração, referido no subcapítulo 2.6.1.3, para a convergência dos parâmetros reológicos pretendidos, mostrou-se ser bastante eficaz para todas as alterações concertadas dos parâmetros reológicos, com excepção da composição de finos A80C+20FCC. Este facto pode ter ocorrido por: uma interpretação menos correcta, relativamente aos valores anteriormente obtidos; não se ter garantido uma humidificação dos aparelhos (cuba da misturadora, cone de espalhamento e funil de fluidez) igual, ou muito semelhante de ensaio para ensaio; ou alteração acentuada das condições atmosféricas (temperatura e humidade);
 - Relativamente à reologia, verificou-se a existência duma correlação linear entre a percentagem de incorporação e a quantidade de água na amassadura (V_w/V_p) (aumenta com a percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC) e a quantidade de superplastificante ($S_p/p\%$) (diminui a percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC);
 - A incorporação igual ou superior a 30% de adição de catalisador exausto de FCC, conduz à ocorrência de exsudação;
 - Coerência dos valores obtidos, com o que seria esperado, no ensaio de velocidade de propagação dos ultrassons, com esta a aumentar ao longo da idade de hidratação;
 - No que diz respeito ao ensaio de flexão conclui-se que estes valores não sofrem, como acontece na compressão, variações significativas ao longo do tempo de hidratação, mantendo-se pode-se dizer constante. E que a incorporação de catalisador exausto de FCC fez diminuir o valor da tensão de rotura à medida que é aumentada, fazendo diminuir em alguns casos cerca de 17,5% de tensão média de rotura (MPa);
 - Os resultados alcançados no ensaio de compressão mostraram ser coerentes pois foi verificado uma evolução assintótica ao longo dos 90 dias de idade, tal como era esperado. Concluiu-se também que, para este ensaio de resistência à compressão, a percentagem de incorporação de adição de catalisador exausto de FCC conducente à máxima resistência se encontra no intervalo de 10 a 20%;
 - Verificou-se influência de actividade pozolânica nos valores de resistência à compressão, uma vez que não existe efeito filler nas argamassas (através da análise granulométrica verifica-se que em média os grãos de catalisador exausto de FCC são superiores, em dimensão, relativamente aos do cimento).

- Fase de betões
 - Os valores dos parâmetros G_m e R_m , obtidos previamente na preparação das argamassas, mostram-se adequados, uma vez que a reologia obtida em todas as composições de betões apresentava-se com uma boa trabalhabilidade, não tendo sido necessário efectuar rectificações nos parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$. de acordo com o raciocínio anterior, julga-se que, esse mesmo intervalo de valores onde os parâmetros reológicos têm de estar compreendidos, de acordo com as relações expressas em (Eq. 2.7) e (Eq. 2.8), pode no caso dos BAC com incorporação de catalisador exausto de FCC ser mais alargado, fazendo com que seja necessário efectuar menos iterações até alcançar os parâmetros reológicos pretendidos;
 - Nos ensaios de consistência no estado fresco, nomeadamente o ensaio de espalhamento e fluidez, os valores obtidos pelas diferentes composições, assemelham-se entre si com o que era esperado. Justifica-se esta ocorrência pelo facto de cada uma das composições terem partido com diferentes parâmetros reológicos de forma a que garantissem, cada uma delas, o comportamento reológico pretendido;
 - No ensaio realizado na caixa L, verificou-se que o betão no estado fresco apresentava uma trabalhabilidade correspondente a uma boa capacidade de passagem aos obstáculos e alta resistência a segregação dos agregados, verificando-se o mesmo raciocínio relativamente ao ensaio anel J
 - Relativamente aos ensaios no estado endurecido, os valores das velocidades de propagação dos ultrassons acompanham, no geral, o raciocínio dos resultados obtidos na fase das argamassas, com a velocidade de propagação a aumentar à medida que a matriz cimentícia se densifica;
 - À semelhança do que se verificou nas argamassas, também os betões com incorporação de catalisador exausto de FCC se manifestaram com uma resistência mecânica superior ao betão de referência B.100C quando submetidos ao ensaio de compressão. Verifica-se, também a sua tendência assintótica ao longo da idade de hidratação e a adição de catalisador exausto de FCC conducente à máxima resistência mecânica a situar-se nos 10-15%;
 - No que diz respeito aos ensaios de absorção de água, por imersão e por capilaridade, não se verificam alterações de relevo com a introdução da adição catalisador exausto de FCC até aos 20% de substituição relativamente à mistura de referência (B.100C). Porém, verifica-se um acréscimo de absorção

significativo na mistura com 25% de adição de catalisador exausto de FCC, sendo que essa verificação ficou mais patente no ensaio de capilaridade. Ficou também comprovado, através dos coeficientes de absorção por capilaridade, que a taxa de absorção de água por capilaridade é superior nos primeiros dias de hidratação dos betões;

- No que se refere à retracção observada, a adição de catalisador exausto de FCC fez aumentar a retracção dos betões relativamente ao betão de referência, tendo estabilizado a partir dos 20% de adição de resíduo;
- Nas classes de consistência, preconizadas pela norma NP EN 206-9 [3], obtiveram-se as seguintes classificações: (SF2: paredes e pilares), com uma boa capacidade de preenchimento e nivelamento (VF1); os BACs preparados podem também ser aplicados nas estruturas mais correntes (60 a 80 mm) com a classificação que se obteve no ensaio da Caixa L (PL2) e no ensaio anel J; os BACs podem apresentar dificuldades no acabamento superficial e com o tempo de espera entre betonagens devido à classificação obtida no ensaio T500 (VS2).

5.2 Propostas para trabalhos futuros

O estudo do tema que foi desenvolvido nesta dissertação serviu para o desenvolvimento da investigação científica na área dos betões principalmente em BACs, sendo que as suas conclusões apresentam uma actualização do estado da arte dos BACs. Contudo, esta dissertação pode e deve vir a ser enriquecida com um conjunto de trabalhos posteriores de modo a continuar este estudo. Apresentam-se as seguintes ideias:

- Realização dum estudo económico das misturas de finos que foram usadas, considerando todas as fases do processo, desde a recolha e transportes dos materiais até a aplicação do BAC em obra;
- Uma avaliação mais aprofundada da contribuição das composições de cimento com catalisador exausto de FCC na mitigação do impacte ambiental causado pela indústria cimentícia;
- A falta de necessidade de correcção de água e superplastificante verificada, aquando da passagem das argamassas para os betões pressupõe que o intervalo de valores nos

parâmetros reológicos poderá, futuramente, sofrer alterações. Seria interessante analisar o intervalo de valores R_m e G_m , de modo a saber até que ponto este intervalo pode ser alargado ou não;

- Realizar mais ensaios de aferição de durabilidade para avaliar o comportamento dos betões, tais como: Migração de Iões de Cloro; Permeabilidade ao Oxigénio; Resistividade Eléctrica; Difusão de Cloretos, etc;
- Verificar o comportamento do betão com incorporação de catalisador exausto de FCC mas com composições ternárias, por exemplo, com introdução de cinzas volantes ou filler calcário. Saber se, desta forma, é possível obter uma maior percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC na composição dos BACs.

Lista de referências bibliográficas

- [1] OKAMURA, H., & OUCHI, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, 15.
- [2] NEPOMUCENO, M. (2005). *Metodologia para betões auto-compactáveis*. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Departamento de engenharia Civil, Covilhã.
- [3] NP EN 206-9. (2010). *Regras adicionais para betão autocompactável (BAC)*. Norma Portuguesa, IPQ.
- [4] NUNES, S. (2001). *Betão Auto-compactável: Tecnologia e propriedades*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil.
- [5] ALYAMAÇ, K., & INCE, R. (2009). A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Elsevier*.
- [6] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. (s.d.). Recommendation for Self-Compacting Concrete.
- [7] (CBI) (Ed.). (s.d.). Obtido em 4 de 2012, de Swedish Cement and Concrete Research Institute: <http://www.cbi.se/viewNavMenu.do?menuID=352>
- [8] DIAS, N. (2002). *Betão auto-compactável branco*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- [9] JÚLIO, E., DIAS, N. C., LOURENÇO, J. F., SILVA, J. A., & COUTINHO, J. S. (2004). conjunto de trabalhos sobre BAC. *Encontro Nacional de Betão Estrutural*.
- [10] NUNES, S., FIGUEIRA, H., PROENÇA, A. M., & COUTINHO, J. S. (2004). Trabalho sobre BAC. *Congresso Nacional da Construção*.
- [11] LNEC. (2012). 1º seminário BPCA. *Betão com prévia colocação do agregado*. Lisboa.
- [12] SILVA, P. (2007). *Método de estudo da composição de betão auto-compactável (BAC) - Verificação da sua aplicabilidade técnico-económica*. Dissertação para grau de Mestre, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil.

- [13] LACASTA, N., & BARATA, P. (1999). *O Protocolo de Quioto sobre alterações climáticas: Análise e Perspectivas*. Programa: Clima e Eficiência Energética. - Citado em (CONCEIÇÃO, I: 2011).
- [14] NATIONS. (1998). *U. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Kyoto: United Nations. - Citado em (CONCEIÇÃO, I. 2011).
- [15] TORGAL, F. (2010). *Eco-eficiência dos Materiais de Construção*. - Citado em (CONCEIÇÃO, I. 2011).
- [16] WBCSD. (2002). *Rumo a uma Indústria Cimenteira Sustentável*. Battelle Memorial Institute, - Citado em (CONCEIÇÃO, I. 2011).
- [17] GALLY, C. (2010). *Desenvolvimento de Materiais Cimentícios de baixo impacto ambiental contendo resíduo catalítico gerado em refinaria de petróleo*. Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia Escola Politécnica, Brasil.
- [18] HENRIQUES, C. (2010). *PORTUGAL, Google docs - Mecanismo de Reações Catalíticas Heterogêneas*. Obtido em 6 de 2011 - Citado em (CONCEIÇÃO, I. 2011)
- [19] CONCEIÇÃO, I. (2011). *Reutilização de Catalisador exausto da Indústria Petroquímica em materiais à base de Cimento*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil.
- [20] KHAYAT, K., & TANGTERMSIRIKUL, S. *Fresh Concrete Properties (Background Document)*. Self-Compacting Concrete: State-of-art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, RILEM Publications S.A.R.L. - Citado em (NEPOMUCENO, M. 2005).
- [21] SKARENDAHL, A. *Definitions and Development Objectives (Background Document)*. Self-Compacting Concrete: State-of-art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC: RILEM Publications S.A.R.L. - Citado em (NEPOMUCENO, M. 2005).
- [22] BUI, V. K., MONTGOMERY, D., HINCZAK, I., & TURNER, K. (2002). *Rapid Testing Method for Segregation Resistance os Self-Compacting Concrete, in Cement and Concrete Research*. Elsevier Science Ltd - Citado em (NEPOMUCENO, M.).
- [23] MARANGON, E. (2006). *Desenvolvimento e caracterização de Concretos Auto-Adensáveis reforçados com fibras de aço*. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Rio de Janeiro - Citado em (SILVA, P. 2007).
- [24] NEPOMUCENO, M. (1999). *Estudo da Composição de Betões, apresentado nas Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica*. UBI, Covilhã.

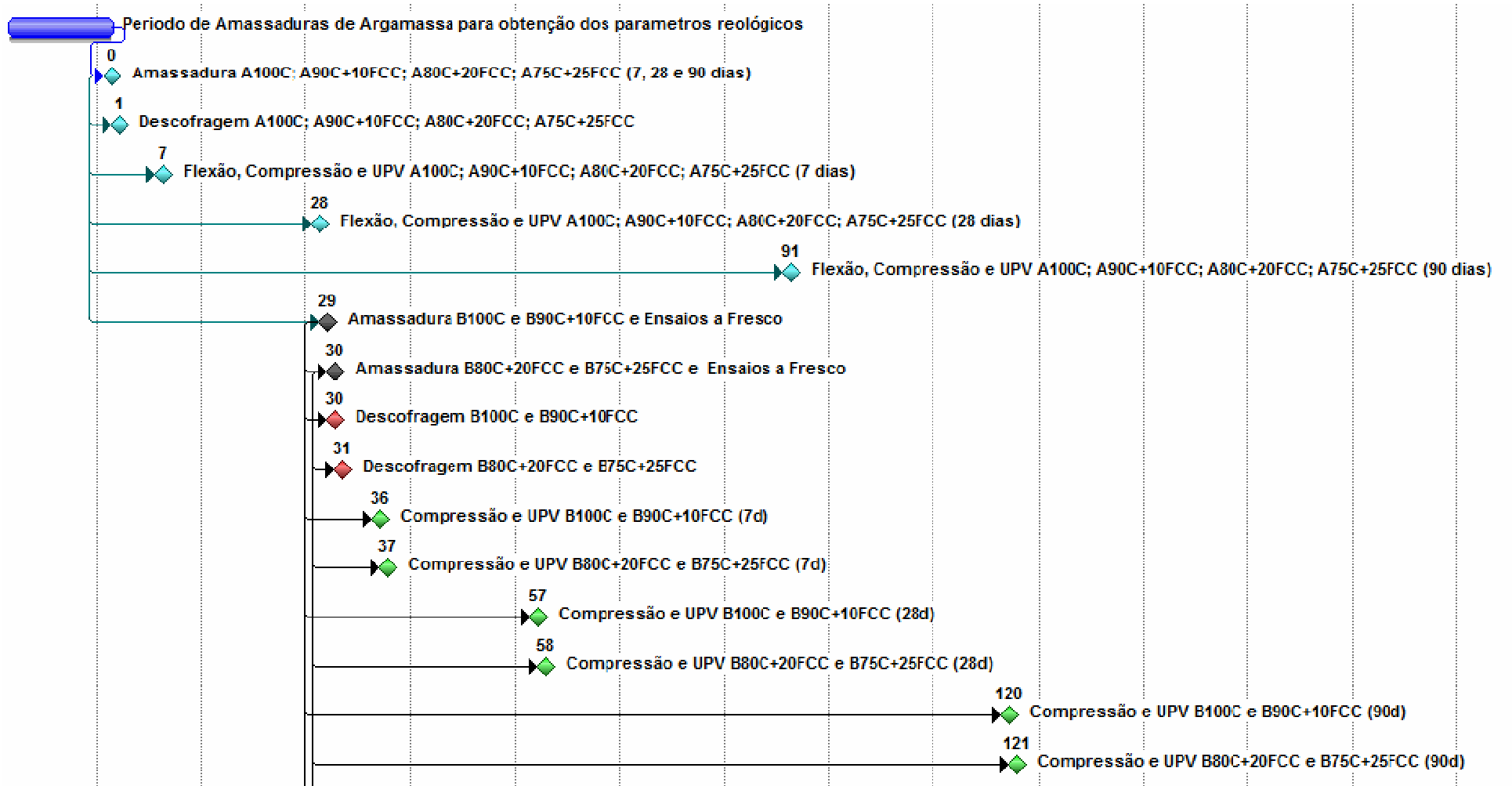
- [25] PETERSSON, O., & BILLBERG, P. (1999). *Investigation on Bloching of Self-Compacting Concrete with Different maximum Aggregate Size and Use of Viscosity Agent Instead of Filler*. Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Suécia - Citado em (NEPOMUCENO, M. 2005).
- [26] TANGTERMSIRIKUL, S. (1998). *Design and Constrution os Self-Compacting Concrete*. International Workshop on Self-Compacting Concrete. Tailândia - Citado em (NEPOMUCENO, M. 2005).
- [27] SILVA, P., & BRITO, J. (2009). *Betão auto-compactável (BAC) - estado actual do conhecimento*.
- [28] EFNARC. (2002). *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Reino Unido.
- [29] OKRAJNOV-BAJIC, R., & VASOVIC, D. (2009). *Self-Compacting Concrete and its application en contemporary architectural practise*. Universidade de Belgrado. Sérvia: SPATIUM International Review.
- [30] *Wikipedia*. (s.d.). Obtido em 5 de 2012, de http://en.wikipedia.org/wiki/File:Akashi-kaikyo_bridge_night_shot_small.jpg
- [31] KWAN, A. (2007). *Performance Criteria for Self-Consolidating Concrete*. Annual Concrete Seminar, Universidade de Hong Kong, Departamento de Engenharia Civil, Hong Kong.
- [32] *LNG World News*. (s.d.). Obtido em 5 de 2012, de <http://www.lngworldnews.com/japan-osaka-gas-eyes-u-s-lng/>
- [33] OUCHI, M. *Self-Compacting Concrete development, applications and investigations*. Universidade Tecnológica de Kochi, Japão.
- [34] *BURJ KHALIFA*. (s.d.). Obtido em 5 de 2012, de <http://www.burjkhalifa.ae/>
- [35] *ENGENHARIA CIVIL*. (s.d.). Obtido em 5 de 2012, de <http://engenhariacivil.wordpress.com/2010/01/05/burj-dubai-burk-khalifa/>
- [36] *DIPITY*. (s.d.). Obtido em 5 de 2012, de http://www.dipity.com/tickr/Flickr_arlanda/
- [37] *IG*. (s.d.). Obtido em 5 de 2012, de <http://colunistas.ig.com.br/clarissaschneider/2010/06/16/maxxi-malismo-em-roma/>
- [38] *Lagoas Park*. (s.d.). Obtido em 1 de 2013, de <http://www.lagoaspark.pt/galeria.html>

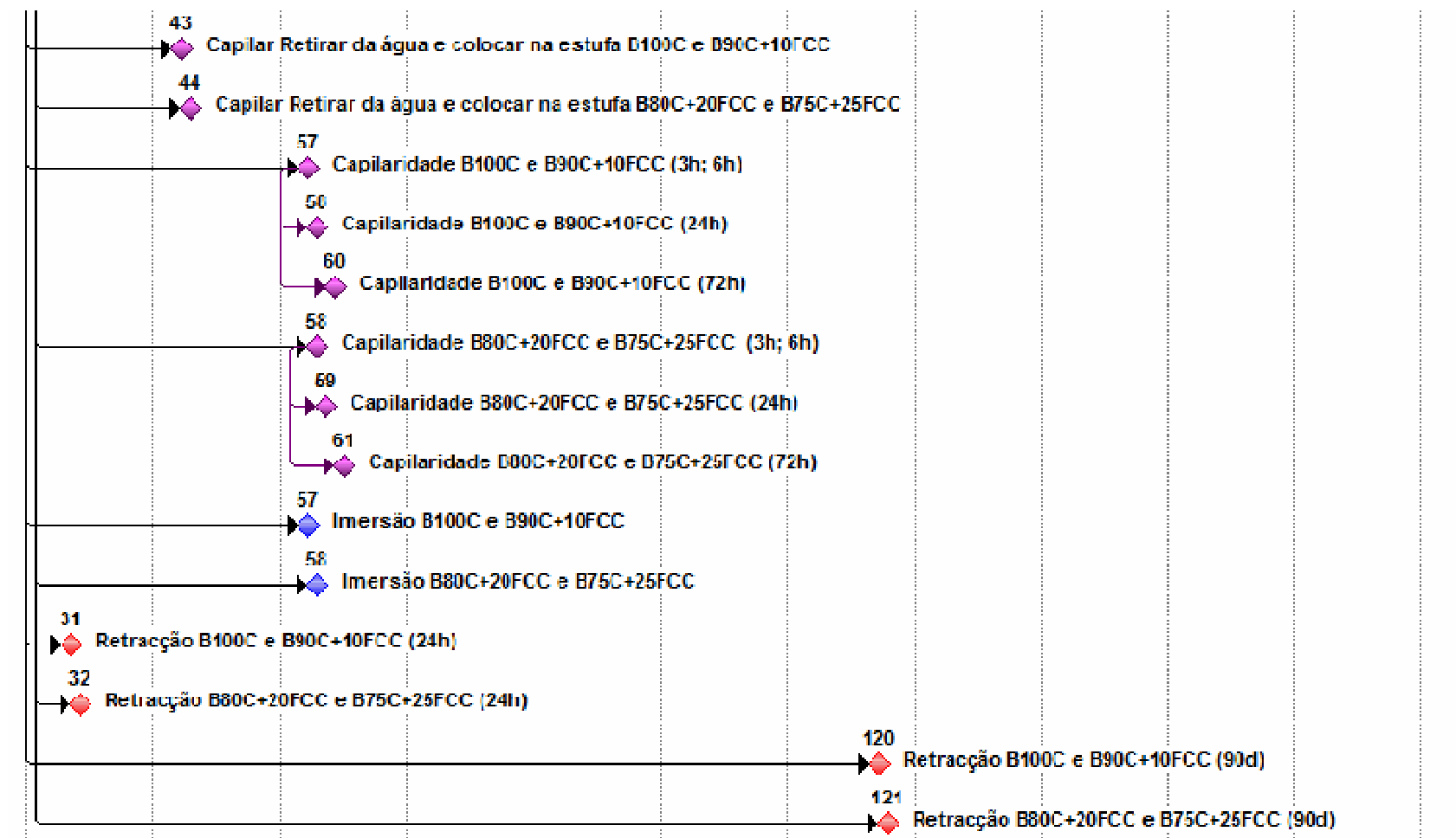
- [39] *monofasica*. (s.d.). Obtido em 1 de 2013, de http://monofasica.pt/custom/detail.php?pf_id=1&lang=pt
- [40] *arrumario*. (s.d.). Obtido em 1 de 2013, de <http://arrumario.blogspot.pt/2006/03/cine-teatro-municipal-do-cartaxo.html>
- [41] NP EN 197-1. (2001). *Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Norma Portuguesa, IPQ.
- [42] APEB - Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto. (2007). *Betão Auto-compactável - Guia para a Especificação, Produção e Utilização*.
- [43] NP EN 206-1. (2007). *Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Norma Portuguesa, IPQ.
- [44] COUTINHO, J. S. (1999). *Materiais de Construção - Agregados para Argamassas e Betões*.
- [45] NP EN 196-1. (2006). *Determinação de resistências mecânicas*. Norma Portuguesa, IPQ.
- [46] BERALDO, A., & VIEIRA, F. (2003). *Ensaio não destrutivos aplicados a argamassas com fibra de sisal*. Rio de Janeiro - Brasil.
- [47] C597 - 09. (2010). *Standart test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM International, Pennsylvania - EUA .
- [48] SCC GUIDELINES. (2003). *Interim guidelines for the Use os Self-Consolidating Concrete*. Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago.
- [49] NP EN 12350-9. (2010). *Ensaio de escoamento no funil V*. IPQ.
- [50] NP EN 12350-10. (2010). *Ensaio de escoamento na caixa L*. Norma Portuguesa, IPQ.
- [51] NP EN 12350-12. (2010). *Ensaio de espalhamento no anel J*. Norma Portuguesa, IPQ.
- [52] RIBEIRO, A. (2010). *Concreto auto-adensável com adição de Metacaulim*. Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil.
- [53] NP EN 12390-3. (2007). *Resistência à compressão de provetes de ensaio*. Norma Portuguesa, IPQ.
- [54] E393. *Betões - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Documentação normativa - Especificação LNEC, MOPTC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

- [55] E394. *Betões - Determinação da absorção de água por imersão*. Documentação normativa - especificação LNEC, MOPTC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [56] E398. *Betões - Determinação da retracção e da expansão*. Documentação normativa - Especificação LNEC, MOPTC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [57] ALMEIDA, E. (2005). *Avaliação do efeito de um adjuvante de retracção no betão auto-compactável*. Projecto final de curso, Universidade do Algarve, Escola Superior de Tecnologia, Área departamental de Engenharia Civil.
- [58] OLIVA, M., & CRAMER, S. (2008). *Self consolidating concrete: creep and shrinkage characteristics*. University of Wisconsin, Department of Civil and Environmental Engineering.
- [59] AMORIM, P. (2008). *Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura/Secção de construção.
- [60] SHERBROOKE, U. d. (Ed.). (s.d.). *Design, Production and Placement of SCC*. Obtido em 4 de 2012, de <http://www.civil.usherbrooke.ca/SCC2010/committees.html>
- [61] SENTENA, J. (2010). *Absorção de água por capilaridade em concretos com agregados reciclados de concreto*. XI Salão de Iniciação Científica - PUCRS, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS.

ANEXOS

ANEXO A - Planeamento da Actividade Laboratorial





6

- ⁶ No ensaio de análise dimensional (Retracção) foram realizadas leituras ao longo do tempo, tal como foi dito no subcapítulo 3.6.4.5.
- Os dias por cima dos quadrados representam os dias passados até à data da primeira amassadura de argamassa.

ANEXO B - Fichas técnicas dos materiais

B.1 Cimento Portland (CEM I 42,5R)

FICHA TÉCNICA

Cimento Portland CEM I 42,5R

NP EN 197-1 0856



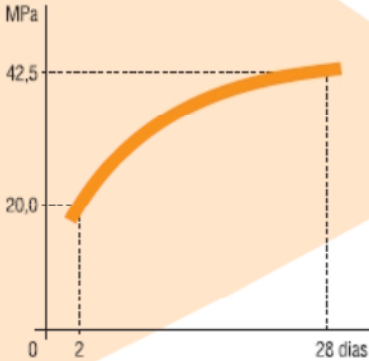
▶ Constituintes

- Clinker $\geq 95\%$
- Constituintes adicionais minoritários $\leq 5\%$
- Sulfato de cálcio regulador de presa

▶ Características

- ▶ Químicas**
 - Perda ao fogo (P.F.) $\leq 5,0\%$
 - Resíduo insolúvel (R.I.) $\leq 5,0\%$
 - Sulfatos (SO_3) $\leq 4,0\%$
 - Cloretos (Cl) $\leq 0,10\%$
- ▶ Físicas**
 - Início de presa (min) ≥ 60
 - Expansibilidade (mm) ≤ 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



Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)
2	20,0
28	42,5

▶ Propriedades especiais do betão fabricado com este cimento

- ▶ Desenvolvimento rápido das resistências mecânicas
- ▶ Elevadas resistências a todas as idades
- ▶ Particularmente adequado para Classes de Exposição XC

Cimento Portland
CEM I 42,5R



▶ Utilizações recomendadas

- ▶ **Betão armado**
Indicado indistintamente para todas as classes de resistência com especial vantagem nas de C30/37 a C45/55
Com desempenho mecânico elevado a 28 dias
- ▶ **Pré-fabricação**
Elementos estruturais em betão armado e pré-esforçado
- ▶ **Pavimentos rodoviários**
Camadas de desgaste para pavimentos fortemente solicitados
- ▶ **Caldas de injeção de uso generalizado**

▶ Acondicionamento



Paleta
49 Sacos de 35 kg - 1715 kg



Pacotão
55 Sacos de 35kg - 1925 kg

Camião de 25 toneladas com meios de descarga próprios devidamente selado



Granel
25 toneladas

▶ Precauções na aplicação

- ▶ Evitar tempos de transporte elevados no caso de betão pronto
- ▶ Respeitar as dosagens de cimento mínimas e as relações água/cimento máximas normativas
- ▶ Assegurar uma cura e protecção adequadas de acordo com as disposições normativas
- ▶ Betonagem em tempo quente e seco

▶ Contra-indicações

- ▶ Contacto com ambientes agressivos (águas e solos)
- ▶ Betonagem em grandes massas
- ▶ Argamassas de uso geral

▶ Ambiente e Segurança

- ▶ Usar vestuário de protecção, luvas e equipamento protector para a vista/face adequados
- ▶ Quando ensacado contém redutor de crómio (VI) cujo período de eficácia é de dois meses após a data de ensacagem
- ▶ Para mais informações, consulte a Ficha de Dados de Segurança



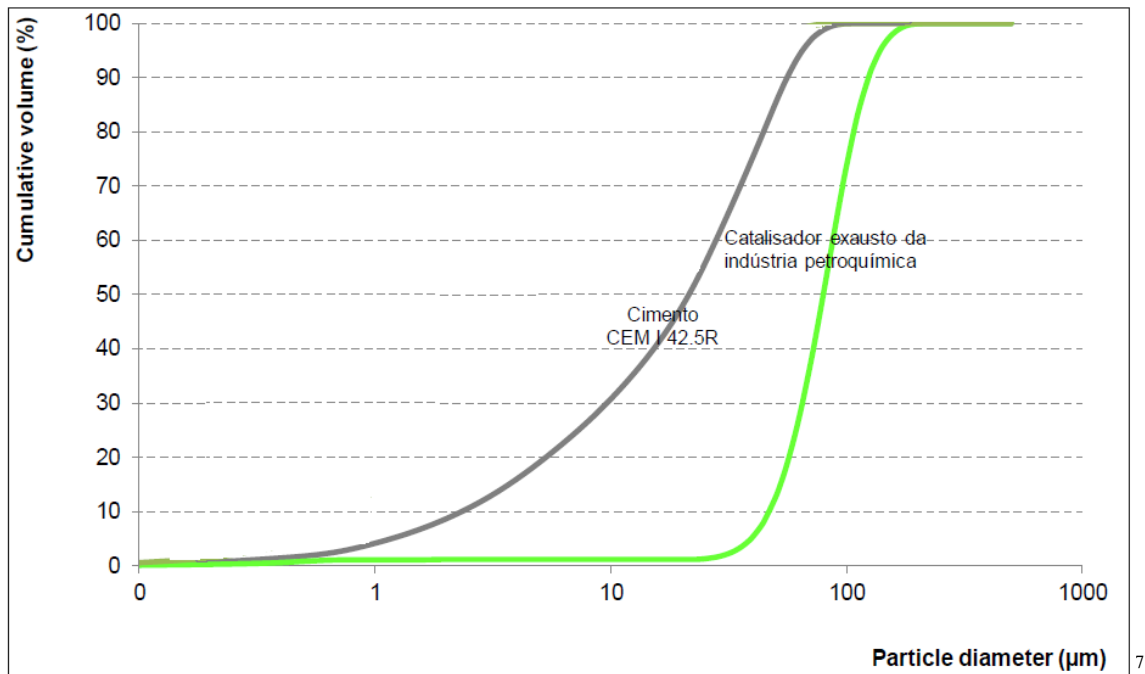
Serviço Comercial
Av. Severiano Fialho, 8 - Edifício CIMPOR - 2680-524 PRINOR VELHO
Tel: 21 940 86 43 - Fax: 21 940 87 60

Serviço Técnico-Comercial
Av. Severiano Fialho, 8 - Edifício CIMPOR - 2680-524 PRINOR VELHO
Tel: 21 940 86 43 - Fax: 21 940 87 54

Serviço de controlo de vendas e crédito
S. Pedro Fins - Maia - Apartado 1023 - 4419-909 ERMEZINDE
Tel: 22 968 80 00 - Fax: 22 967 18 38

www.cimpor-portug.pt
Dcomercial@cimpor.com

B.2 Análise granulométrica por difracção de raios laser do cimento CEM I 42,5R e catalisador exausto de FCC usados em laboratório:



⁷ C.Costa, P.M. LOW-CARBON CEMENT WITH WASTE OIL-CRACKING CATALYST INCORPORATION. in Cement Industry Technical Conference, 2012 IEEE-IAS/PCA 54th Cement. 2012. San Antonio, Austin, USA.

B.3 Superplastificante

Construction

Ficha de Produto
Edição de Abril de 2011
Nº de identificação: 01.111
Versão nº 1
SikaPlast® 898



SikaPlast® 898

Powered by ViscoCrete®

Superplastificante de elevado desempenho

Descrição do produto	SikaPlast® 898 é um superplastificante forte redutor de água para betão.
Utilizações	<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">■ Betões plásticos a fluidos.■ Betões com diferentes razões A/C.■ Betão bombeado para longas distâncias.■ Betão com agregados britados.■ Prefabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ. <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 polícarboxilatos.</p>
Características/Vantagens	<p>SikaPlast® 898 é um superplastificante/forte redutor de água que confere ao betão as seguintes propriedades:</p> <ul style="list-style-type: none">■ Excelente trabalhabilidade conjugada com o elevado desempenho a nível do desenvolvimento das resistências.■ Alta redução de água, conforme a dosagem e a composição; daqui resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compacidade elevada e de permeabilidade muito baixa.■ Boas resistências iniciais e finais.■ Excelente performance quer usado sozinho como combinado com outros adjuvantes.■ Maior robustez contra variações nos agregados e/ou diferentes tipos de cimento.■ Bom aspecto da superfície na descofragem■ Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em prefabricação, com bom desenvolvimento de resistências. <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-esforçado.</p>
Certificados/Boletins de Ensaio	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.
Dados do produto	
Aspecto / Cor	Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.
Fornecimento	214 kg (200 litros); 1070 kg (1 m ³); granel.



SikaPlast® 898 1/3

Armazenagem e conservação	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.
Dados técnicos	
Base química	Combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa.
Massa volúmica	1,07 ± 0,02 kg/dm ³ (a +23 ±2 °C)
pH (23 ± 2°C)	5,0 ± 1,0.
Teor de sólidos	32,0 ± 2,0 %.
Teor em iões cloreto	≤ 0,1%.
Informação sobre o sistema	
Pormenores de aplicação	
Consumo / Dosagem	Conforme o objectivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens: <ul style="list-style-type: none"> ■ Dosagem corrente: 0,5% a 1,5% do peso do cimento. ■ Dosagens especiais: 1,5% a 2,0% do peso do cimento.
Mistura	Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de $\frac{2}{3}$ da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energicamente cerca de 1 minuto/m ³ ; só então será adicionada mais alguma água até à consistência desejada. Este processo conduz ao aproveitamento máximo do adjuvante e permite controlar convenientemente a razão água/ligante. Se o processo não for viável, então adicionar o produto à água de amassadura previamente determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogénea. É importante garantir um tempo mínimo de 1,5 a 2 minutos de amassadura, para obter o efeito pleno do adjuvante. Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia). É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão. No caso de redosagem em obra, deve haver o cuidado de homogeneizar bem o adjuvante na massa do betão. Para isso, recomenda-se uma muito pequena adição de água no recipiente que contém o adjuvante, apenas para reduzir a sua viscosidade e facilitar a sua boa incorporação. O betão deve ser "puxado" acima e o adjuvante deve ser adicionado lentamente, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário, inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneização. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.
Aplicação	SikaPlast® 898 permite o fabrico de betão de qualidade, 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.
Compatibilidade	SikaPlast® 898 pode ser combinado com os seguintes produtos: <ul style="list-style-type: none"> ■ Sika® FerroGard® 901. ■ Sika® Pump. ■ Sika® Rapid ■ Sikacrete®. Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.
Limpeza de ferramentas	Limpar todas as ferramentas e equipamento com água imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.

Importante	<ul style="list-style-type: none">■ 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.■ Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se. <p>Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.</p>
Nota	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.
Risco e segurança	
Medidas de segurança	<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><i>"O produto está seguro na C^o Seguros XL Insurancee Switzerland (Apólice nº CH00003018LI05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".</i></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 aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.</p>
Marcação CE	<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-esforçados 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>

ANEXO C - Fichas de cálculo das
amassaduras

C.1 Ficha de cálculo para a argamassa A.100C

COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS						
Identificação da argamassa A.100C						
Parâmetros da composição			Mistura dos finos		Mistura agregados	
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Cim	FCC	Areia 01	Areia 04
0,80	0,82	1,80	1	0	0,6	0,4
Massas Volumicas dos materiais, kg/m³						
Cim	FCC	W	Areia 01	Areia 04	Sp	
3140	2710	1000	2580	2550	1070	
dp=			3140,00 kg/m ³			
Vsp/Vp=			0,052822 m ³ /m ³			
Vp=			0,32022 m ³ /m ³			
Vw=			0,26258 m ³ /m ³			
Vsp=			0,016915 m ³ /m ³			
Vs=			0,400279 m ³ /m ³			
Cálculo auxiliar						
Absorção de água%						
Areia 01		Areia 04				
0,7		1,1				
W(real) (g)		434,26				
dW (g)		14,13				
80%		347,41				
20%		86,85				
Quantidades para um vol. de:			1000,00 LITROS			
Materiais	Massa (kg)	Volume (l)				
C=	1005,5	320,2				
FCC=	0,0	0,0	<u>Massa total (kg)</u>			
W=	262,6	262,6	2314,1			
Areia 01	619,6	240,2				
Areia 04	408,28	160,1	<u>Razão W/C</u>			
Sp=	18,10	16,9	0,261			
			<u>Razão W/p</u>			
			0,261			
Quantidades para um vol. de:			1,60 LITROS			
Materiais	Massa (g)	Volume (ml)				
C=	1608,8	512,4				
FCC=	0,0	0,0	<u>Massa total (kg)</u>			
W=	420,1	420,1	3702,6			
Areia 01	991,4	384,3				
Areia 04	653,3	256,2	<u>Razão W/C</u>			
Sp=	29,0	27,06	0,261			
			<u>Razão W/p</u>			
			0,261			

⁸ O cálculo auxiliar nas células a roxo é referente ao acréscimo de água devido à absorção dos agregados.

C.2 Ficha de cálculo para a argamassa A.90C + 10FCC

COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS						
Identificação da argamassa A.90C + 10FCC						
Parâmetros da composição			Mistura dos finos		Mistura agregados	
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Cim	FCC	Areia 01	Areia 04
0,80	0,90	1,40	0,9	0,1	0,6	0,4
Massas Volumicas dos materiais, kg/m³						
Cim	FCC	W	Areia 01	Areia 04	Sp	
3140	2710	1000	2580	2550	1070	
dp=			3097,00 kg/m ³			
Ysp/Yp=			0,040521 m ³ /m ³			
Yp=			0,31343 m ³ /m ³			
Yw=			0,28209 m ³ /m ³			
Ysp=			0,012701 m ³ /m ³			
Ys=			0,391785 m ³ /m ³			
Cálculo auxiliar						
Absorção de água%						
Areia 01		Areia 04				
0,7		1,1				
W(real) (g)		465,16				
dW (g)		13,83				
80%		372,13				
20%		93,03				
Quantidades para um vol. de:			1000,00 LITROS			
Materiais	Massa (kg)	Volume (l)				
C=	885,7	282,1				
FCC=	84,9	31,3				
W=	282,1	282,1				
Areia 01	606,5	235,1				
Areia 04	399,62	156,7				
Sp=	13,59	12,7				
			Massa total (kg) 2272,5			
			Razão w/c		Razão w/p	
			0,318		0,291	
Quantidades para um vol. de:			1,60 LITROS			
Materiais	Massa (g)	Volume (ml)				
C=	1417,2	451,3				
FCC=	135,9	50,1				
W=	451,3	451,3				
Areia 01	970,4	376,1				
Areia 04	639,4	250,7				
Sp=	21,7	20,32				
			Massa total (kg) 3635,9			
			Razão w/c		Razão w/p	
			0,318		0,291	

C.3 Ficha de cálculo para a argamassa A.80C + 20FCC

COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS																																											
Identificação da argamassa A.80C + 20FCC																																											
Parâmetros da composição			Mistura dos finos		Mistura agregados																																						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Cim	FCC	Areia 01 Areia 04																																						
0,80	1,00	0,80	0,8	0,2	0,6 0,4																																						
Massas Volumicas dos materiais, kg/m³																																											
Cim	FCC	W	Areia 01	Areia 04	Sp																																						
3140	2710	1000	2580	2550	1070																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">dp=</td> <td style="text-align: center;">3054,00</td> <td style="text-align: center;">kg/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vsp/Vp=</td> <td style="text-align: center;">0,022834</td> <td style="text-align: center;">m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vp=</td> <td style="text-align: center;">0,30555</td> <td style="text-align: center;">m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vw=</td> <td style="text-align: center;">0,30555</td> <td style="text-align: center;">m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vsp=</td> <td style="text-align: center;">0,006977</td> <td style="text-align: center;">m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vs=</td> <td style="text-align: center;">0,381932</td> <td style="text-align: center;">m³/m³</td> </tr> </table>			dp=	3054,00	kg/m ³	Vsp/Vp=	0,022834	m ³ /m ³	Vp=	0,30555	m ³ /m ³	Vw=	0,30555	m ³ /m ³	Vsp=	0,006977	m ³ /m ³	Vs=	0,381932	m ³ /m ³	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Cálculo auxiliar</th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Absorção de água%</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Areia 01</td> <td style="text-align: center;">Areia 04</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,7</td> <td style="text-align: center;">1,1</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">W(real) (g)</td> <td style="text-align: center;">502,35</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">dW (g)</td> <td style="text-align: center;">13,48</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">80%</td> <td style="text-align: center;">401,88</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">20%</td> <td style="text-align: center;">100,47</td> </tr> </table>			Cálculo auxiliar		Absorção de água%		Areia 01	Areia 04	0,7	1,1			W(real) (g)	502,35	dW (g)	13,48			80%	401,88	20%	100,47
dp=	3054,00	kg/m ³																																									
Vsp/Vp=	0,022834	m ³ /m ³																																									
Vp=	0,30555	m ³ /m ³																																									
Vw=	0,30555	m ³ /m ³																																									
Vsp=	0,006977	m ³ /m ³																																									
Vs=	0,381932	m ³ /m ³																																									
Cálculo auxiliar																																											
Absorção de água%																																											
Areia 01	Areia 04																																										
0,7	1,1																																										
W(real) (g)	502,35																																										
dW (g)	13,48																																										
80%	401,88																																										
20%	100,47																																										
Quantidades para um vol. de:			1000,00 LITROS																																								
Materiais	Massa (kg)	Volume (l)																																									
C=	767,5	244,4																																									
FCC=	165,6	61,1	Massa total (kg)																																								
W=	305,5	305,5	2226,9																																								
Areia 01	591,2	229,2																																									
Areia 04	389,57	152,8	Razão W/C																																								
Sp=	7,47	7,0	0,398																																								
			Razão W/p																																								
			0,327																																								
Quantidades para um vol. de:			1,60 LITROS																																								
Materiais	Massa (g)	Volume (ml)																																									
C=	1228,0	391,1																																									
FCC=	265,0	97,8	Massa total (kg)																																								
W=	488,9	488,9	3563,1																																								
Areia 01	946,0	366,7																																									
Areia 04	623,3	244,4	Razão W/C																																								
Sp=	11,9	11,16	0,398																																								
			Razão W/p																																								
			0,327																																								

C.4 Ficha de cálculo para a argamassa A.75C + 25FCC

COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS						
Identificação da argamassa A.75C + 25FCC						
Parâmetros da composição			Mistura dos finos		Mistura agregados	
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Cim	FCC	Areia 01	Areia 04
0,80	1,07	0,68	0,75	0,25	0,6	0,4
Massas Volumicas dos materiais, kg/m3						
Cim	FCC	W	Areia 01	Areia 04	Sp	
3140	2710	1000	2580	2550	1070	
dp=			3032,50 kg/m ³			
Vsp/Vp=			0,019272 m ³ /m ³			
Vp=			0,29947 m ³ /m ³			
Vw=			0,32043 m ³ /m ³			
Vsp=			0,005771 m ³ /m ³			
Vs=			0,374333 m ³ /m ³			
Cálculo auxiliar						
Absorção de água%						
Areia 01			Areia 04			
0,7			1,1			
w(real) (g)			525,90			
d'w (g)			13,21			
80%			420,72			
20%			105,18			
Quantidades para um vol. de:			1000,00 LITROS			
Materiais	Massa (kg)	Volume (l)				
C=	705,2	224,6	<u>Massa total (kg)</u>			
FCC=	202,9	74,9	2196,0			
W=	320,4	320,4				
Areia 01	579,5	224,6	<u>Razão w/C</u>	<u>Razão w/p</u>		
Areia 04	381,82	149,7	0,454	0,353		
Sp=	6,18	5,8				
Quantidades para um vol. de:			1,60 LITROS			
Materiais	Massa (g)	Volume (ml)				
C=	1128,4	359,4	<u>Massa total (kg)</u>			
FCC=	324,6	119,8	3513,6			
W=	512,7	512,7				
Areia 01	927,1	359,4	<u>Razão w/C</u>	<u>Razão w/p</u>		
Areia 04	610,9	239,6	0,454	0,353		
Sp=	9,9	9,23				

C.5 Ficha de cálculo para o betão B.100C

COMPOSIÇÃO DOS BETÕES											
Identificação do Betão A.100C											
Parâmetros da composição				Mistura dos materiais							
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Vv	Vm/Vg	Finos		Áreas		Britas		
					Cim	FCC	Areia 01	Areia 04	Brita 1	Brita 2	
0,8	0,82	1,80	0,030	2,275	1	0	0,6	0,4	0,6	0,4	
Massas Volumicas dos materiais, kg/m³											
Cim	FCC	W	Areia 01	Areia 04	Sp	Brita 1	Brita 2				
3140	2710	1000	2580	2550	1070	2563,80	2597,60				
dp=			3140,00 kg/m ³								
Vsp/Vp=			0,052822								
Vg=			0,29618321 m ³ /m ³								
Vm=			0,67381679 m ³ /m ³								
Vp=			0,21577 m ³ /m ³								
Vw=			0,17693 m ³ /m ³								
Vsp=			0,011398 m ³ /m ³								
Vs=			0,269715 m ³ /m ³								
Vs/Vm=			0,400279								
								Cálculo Auxiliar			
								Absorção água %			
								Areia 01	Areia 04	Brita 1	Brita 2
								0,7	1,1	0,0	0,0
								w(real) (Kg)	15,00		
								dW (Kg)	0,49		
								80%	12,00		
								20%	3,00		
Quantidades para um vol. de:			1000,0 LITROS			Quantidades para um vol. de:			82,0 LITROS		
Materiais	Massa (kg)	Volume (l)				Materiais	Massa (kg)	Volume (l)			
C=	677,52	215,77	Massa total (kg)			C=	55,56	17,69	Massa total (kg)		
FCC=	0,00	0,00	2322,6			FCC=	0,00	0,00	190,46		
W=	176,93	176,93				W=	14,51	14,51			
Areia 01	417,52	161,83	Razão w/C			Areia 01	34,24	13,27	Razão w/C		
Areia 04	275,11	107,89	0,261			Areia 04	22,56	8,85	0,261		
Brita 1	455,61	177,71				Brita 1	37,36	14,57			
Brita 2	307,75	118,47	Razão w/p			Brita 2	25,24	9,71	Razão w/p		
Sp=	12,20	11,40	0,261			Sp=	1,00	0,93	0,261		

C.6 Ficha de cálculo para o betão B.90C + 10FCC

COMPOSIÇÃO DOS BETÕES											
Identificação do Betão A.90C + 10FCC											
Parâmetros da composição					Mistura dos materiais						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Vv	Vm/Vg	Finos		Areias		Britas		
					Cim	FCC	Areia 01	Areia 04	Brita 1	Brita 2	
0,8	0,90	1,40	0,030	2,275	0,9	0,1	0,6	0,4	0,6	0,4	
Massas Volumicas dos materiais, kg/m³											
Cim	FCC	w	Areia 01	Areia 04	Sp	Brita 1	Brita 2				
3140	2710	1000	2580	2550	1070	2563,80	2597,60				
dp= 3097,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,040521 Vg= 0,29618321 m ³ /m ³ Vm= 0,67381679 m ³ /m ³ Vp= 0,21119 m ³ /m ³ Vw= 0,19007 m ³ /m ³ Vsp= 0,008558 m ³ /m ³ Vs= 0,263992 m ³ /m ³ Vs/Vm= 0,391785											
Cálculo Auxiliar											
Absorção água %											
		Areia 01	Areia 04	Brita 1	Brita 2						
		0,7	1,1	1,8	1,6						
		w(real) (Kg)		17,15							
		d'w (kg)		1,56							
		80%		13,72							
		20%		3,43							
Quantidades para um vol. de:			1000,0 LITROS			Quantidades para um vol. de:			82,0 LITROS		
Materiais	Massa (kg)	Volume (l)				Materiais	Massa (kg)	Volume (l)			
C=	596,83	190,07	Massa total (kg)			C=	48,94	15,59	Massa total (kg)		
FCC=	57,23	21,12	2294,6			FCC=	4,69	1,73	188,16		
w=	190,07	190,07				w=	15,59	15,59			
Areia 01	408,66	158,39	Razão w/C			Areia 01	33,51	12,99	Razão w/C		
Areia 04	269,27	105,60	0,318			Areia 04	22,08	8,66	0,318		
Brita 1	455,61	177,71				Brita 1	37,36	14,57			
Brita 2	307,75	118,47	Razão w/p			Brita 2	25,24	9,71	Razão w/p		
Sp=	9,16	8,56	0,291			Sp=	0,75	0,70	0,291		

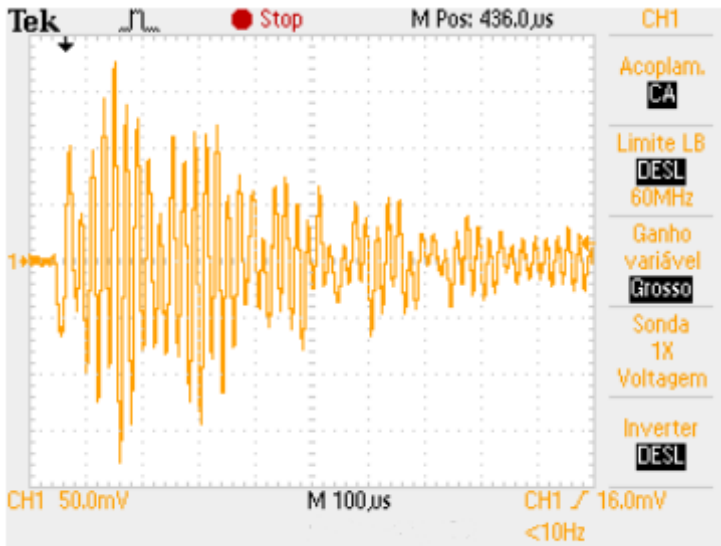
C.7 Ficha de cálculo para o betão B.80C + 20FCC

COMPOSIÇÃO DOS BETÕES											
Identificação do Betão A.80C + 10FCC											
Parâmetros da composição					Mistura dos materiais						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Vv	Vm/Vg	Finos		Areias		Britas		
0,8	1,00	0,80	0,030	2,275	Cim	FCC	Areia 01	Areia 04	Brita 1	Brita 2	
					0,8	0,2	0,6	0,4	0,6	0,4	
Massas Volumicas dos materiais, kg/m³											
Cim	FCC	W	Areia 01	Areia 04	Sp	Brita 1	Brita 2				
3140	2710	1000	2580	2550	1070	2563,80	2597,60				
dp=			3054,00	kg/m ³							
Vsp/Vp=			0,022834								
Vg=			0,29618321	m ³ /m ³							
Vm=			0,67381679	m ³ /m ³							
Vp=			0,20588	m ³ /m ³							
Vw=			0,20588	m ³ /m ³							
Vsp=			0,004701	m ³ /m ³							
Vs=			0,257352	m ³ /m ³							
Vs/Vm=			0,381932								
Cálculo Auxiliar											
Absorção água %											
		Areia 01	Areia 04	Brita 1	Brita 2						
		0,7	1,1	0,0	0,0						
		W(real) (Kg)	17,35								
		dW (Kg)	0,47								
		80%	13,88								
		20%	3,47								
Quantidades para um vol. de:			1000,0 LITROS			Quantidades para um vol. de:			82,0 LITROS		
Materiais	Massa (kg)	Volume (l)				Materiais	Massa (kg)	Volume (l)			
C=	517,18	164,71	Massa total (kg)			C=	42,41	13,51	Massa total (kg)		
FCC=	111,59	41,18	2263,9			FCC=	9,15	3,38	185,64		
W=	205,88	205,88	Razão w/C			W=	16,88	16,88	Razão w/C		
Areia 01	398,38	154,41	0,398			Areia 01	32,67	12,66	0,398		
Areia 04	262,50	102,94	Razão w/p			Areia 04	21,52	8,44	Razão w/p		
Brita 1	455,61	177,71	0,327			Brita 1	37,36	14,57	0,327		
Brita 2	307,75	118,47				Brita 2	25,24	9,71			
Sp=	5,03	4,70				Sp=	0,41	0,39			

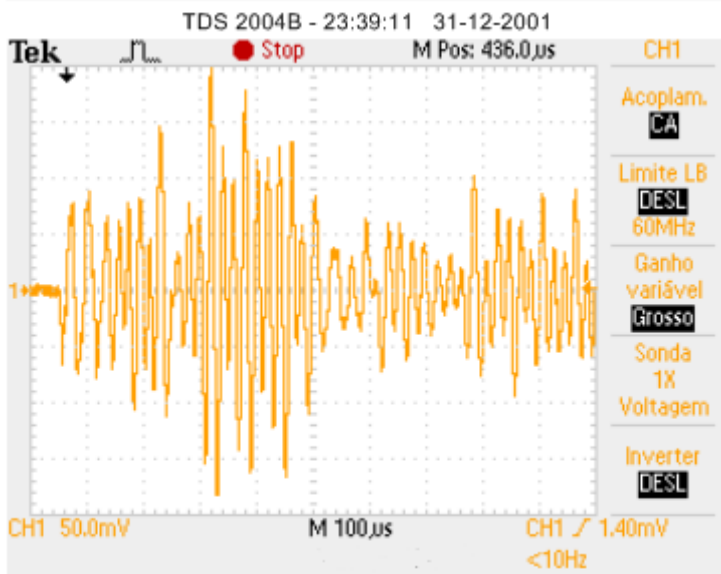
C.8 Ficha de cálculo para o betão B.75C + 25FCC

COMPOSIÇÃO DOS BETÕES											
Identificação do Betão A.75C + 25FCC											
Parâmetros da composição					Mistura dos materiais						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Vv	Vm/Vg	Finos		Areias		Britas		
					Cim	FCC	Areia 01	Areia 04	Brita 1	Brita 2	
0,8	1,07	0,68	0,030	2,275	0,75	0,25	0,6	0,4	0,6	0,4	
Massas Volumicas dos materiais, kg/m³											
Cim	FCC	W	Areia 01	Areia 04	Sp	Brita 1	Brita 2				
3140	2710	1000	2580	2550	1070	2563,80	2597,60				
					Cálculo Auxiliar						
					Absorção água %						
					Areia 01	Areia 04	Brita 1	Brita 2			
					0,7	1,1	0,0	0,0			
					w(real) (Kg)		18,16				
					dW (Kg)		0,46				
					80%		14,53				
					20%		3,63				
Quantidades para um vol. de:			1000,0 LITROS			Quantidades para um vol. de:			82,0 LITROS		
Materiais	Massa (kg)	Volume (l)				Materiais	Massa (kg)	Volume (l)			
C=	475,20	151,34	Massa total (kg)			C=	38,97	12,41	Massa total (kg)		
FCC=	136,71	50,45	2243,1			FCC=	11,21	4,14	183,93		
W=	215,91	215,91	Razão w/C			W=	17,70	17,70	Razão w/C		
Areia 01	390,46	151,34	0,454			Areia 01	32,02	12,41	0,454		
Areia 04	257,28	100,89	Razão w/p			Areia 04	21,10	8,27	Razão w/p		
Brita 1	455,61	177,71	0,353			Brita 1	37,36	14,57	0,353		
Brita 2	307,75	118,47				Brita 2	25,24	9,71			
Sp=	4,16	3,89				Sp=	0,34	0,32			

ANEXO D - Ondas longitudinais obtidas no osciloscópio



A.90C+10FCC (90 dias)



B.90C+10FCC (90 dias)

