



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

Análise da retenção da trabalhabilidade da fase argamassa dos betões auto-compactáveis

Miguel Filipe Silva Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Miguel Costa Santos Nepomuceno

Covilhã, Junho de 2011

Dedicatória

Dedico esta dissertação a toda a minha família e amigos, que sempre me apoiaram durante esta árdua caminhada. Com destaque e de forma muito especial, aos meus pais (António e Dolores), à minha irmã (Rita) e às mulheres da minha vida (Rute e Benedita).

Agradecimentos

Um enorme bem-haja aos meus pais (António e Dolores) que foram incansáveis ao longo destes anos ao me apoiarem e incentivarem, para que fosse possível concretizar um importante objectivo da minha vida.

De igual modo um muito obrigado à minha irmã (Rita) e esposa (Rute) por todo o carinho, compreensão e apoio prestado.

Rute, obrigada pela tua segurança e o teu lindo sorriso.

Todo o meu esforço e empenho foi compensado graças ao apoio que me foi dado de forma directa ou indirecta por parte de toda a minha família, colegas e amigos, a todos um muito obrigado.

Agradeço à Universidade da Beira Interior por toda a formação e tradição académica que me proporcionou ao longo desta caminhada.

Um agradecimento muito especial ao Professor Miguel Costa Santos Nepomuceno pelo apoio, incentivo, compreensão e pela grande disponibilidade que sempre demonstrou ao longo do desenvolvimento do trabalho. Tenho-o como um Professor de grandes qualidades, mas principalmente como um amigo, que com a sua experiência, humanidade e sabedoria me orientou de forma exemplar.

O autor agradece à empresa *Omya Comital Minerais Especialidades, SA*, na pessoa do Dr. Paulo Pinto, o fornecimento do fíler calcário (*Betocarb P1-OU*).

Agradece também à empresa de betão pronto “*Betão Liz*”, localizada no concelho da Covilhã, o fornecimento das areias naturais (*Areia 0/2 e Areia 0/4*).

Por fim, um agradecimento à empresa *Sika Portugal - Produtos Construção e Indústria, SA*, o fornecimento do superplastificante (*SikaViscocrete 3005*).

Resumo analítico

ANÁLISE DA RETENÇÃO DA TRABALHABILIDADE DA FASE ARGAMASSA DOS BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS

A trabalhabilidade do betão auto-compactável durante o enchimento das cofragens em obra é determinante para a maior ou menor compacidade do produto final, uma vez que este betão é aplicado sem qualquer vibração ou outra forma de compactação. Tem sido referido que os processos de produção, transporte e colocação do betão auto-compactável podem afectar as suas propriedades no estado fresco e que, comparativamente com um betão corrente, a trabalhabilidade deste tipo de betões é mais sensível à variação dos materiais, variações na dosagem de água, sequência e duração da amassadura, temperatura ambiente, condições e duração do transporte, condições de colocação, entre outras. No processo de transporte deverá observar-se qualquer possível efeito de segregação dos agregados, mas especialmente relevante será a avaliação da retenção da trabalhabilidade ao longo do tempo.

A presente dissertação avaliou a influência que o tipo de cimento, a temperatura de amassadura e a dosagem de superplastificante exercem na capacidade de retenção ou manutenção da trabalhabilidade de betões auto-compactáveis ao longo do tempo decorrido após amassadura. Esse estudo foi realizado em argamassas adequadas à produção e betões auto-compactáveis e a trabalhabilidade foi avaliada de forma indirecta através dos ensaios de espalhamento (slump-flow) e de fluidez (Funil-V).

Os resultados obtidos proporcionaram uma análise comparativa e crítica da influência relativa dos vários parâmetros seleccionados. Os dados obtidos experimentalmente foram promissores no que respeita à análise da retenção de trabalhabilidade em argamassas. Verificou-se que todos os parâmetros analisados influenciaram a retenção da trabalhabilidade das argamassas, sendo que uns são mais preponderantes que outros. As misturas com o cimento de endurecimento lento, menor temperatura de amassadura e maior dosagem de superplastificante foram as que registaram menores perdas de trabalhabilidade ao longo do tempo decorrido após amassadura, sendo que a dosagem de superplastificante se revelou o factor mais preponderante.

Palavras-chave:

Betão auto-compactável, retenção da trabalhabilidade, trabalhabilidade, ensaios reológicos.

Abstract

WORKABILITY RETENTION ANALYSIS OF THE MORTAR PHASE OF SELF-COMPACTING CONCRETE

The workability of self-compacting concrete when filling the formwork on site is critical to a greater or lesser compactness of the final product, since this concrete is applied without any vibration or other form of compaction. It has been reported that the processes of production, transportation and placement of self-compacting concrete may affect its fresh properties and that, compared with a normal vibrated concrete, the workability of this type of concrete is more sensitive to variation of materials, variations in water dosage, sequence and duration of mixing, temperature, conditions and duration of transport, conditions of placement, among others. In the process of transportation it should be pointed out any possible effect of segregation of the aggregates, but especially relevant is the assessment of the workability retention over time.

This thesis evaluated the influence that the type of cement, mixing temperature and dosage of superplasticizer exercise in the retention capacity or maintenance of the workability of self-compacting concrete along the time after mixing. This study was conducted on mortars adequate to the production of self-compacting concrete and workability was assessed indirectly through tests of slump flow and fluidity (Funnel-V).

The results provided a comparative and critical analysis of the relative influence of various parameters selected. The experimental data were promising as regards the analysis of the retention of workability in mortars. It was found that all measured parameters influenced the retention of the workability of mortars after mixing, and some are more predominant than others. The mixtures with the cement of low heat of hydration, the lower temperature of mixing and higher dosage of superplasticizer were those that revealed the smallest loss of workability over time elapsed after mixing, and the dosage of superplasticizer emerged as the most dominant factor.

Keywords:

Self-compacting concrete, workability retention, workability, rheological tests.

Índice

	Pág.
Capítulo 1 - Introdução	
1.1 - Enquadramento do tema	1
1.2 - Objectivos e justificação do tema proposto	3
1.3 - Organização do trabalho	4
Capítulo 2 - Os métodos de dosagem que utilizam a fase argamassa e a fase betão	
2.1 - Introdução	7
2.2 - Métodos de estudo da composição do BAC	7
2.2.1 - Método de Okamura	8
2.2.1.1 - Volume de ar	9
2.2.1.2 - Agregados grossos	9
2.2.1.3 - Agregados finos	10
2.2.1.4 - Razão volumétrica água/finos e dosagem de superplastificante	11
2.2.2 - Método de Nepomuceno	13
2.2.2.1 - Dados essenciais de base	14
2.2.2.2 - Opções de base: materiais	14
2.2.2.3 - Estudos em argamassas	16
2.2.2.4 - Estudos em betões	25
2.3 - Conclusões	30
Capítulo 3 - A retenção da trabalhabilidade e a sua contextualização	
3.1 - Introdução	33
3.2 - Avaliação das propriedades no estado fresco	33
3.2.1 - Argamassa	33
3.2.2 - Betão	34
3.2.2.1 - Reologia	34
3.2.2.2 - Trabalhabilidade	35
3.3 - Produção, transporte e colocação em obra	36
3.3.1 - Controlo da produção do betão	36
3.3.2 - Transporte do betão	37
3.3.3 - Recepção do betão em obra	38
3.3.4 - Colocação do betão	39
3.4 - Conclusões	39

Capítulo 4 - Descrição do programa experimental

4.1 - Introdução	41
4.2 - Caracterização dos materiais utilizados	42
4.2.1 - Ligantes	42
4.2.2 Adições	42
4.2.3 - Agregados finos	43
4.2.4 - Adjuvantes	43
4.2.5 - Água de amassadura	44
4.3 - Proporções das misturas	44
4.3.1 - Argamassa de referência	44
4.3.1.1- Influência das dosagens de água e superplastificante nas propriedades reológicas da argamassa de referência	46
4.3.2 - Influência do tipo de cimento (<i>Série a</i>)	47
4.3.3 - Influência da temperatura (<i>Série b</i>)	48
4.3.4 - Influência da dosagem de superplastificante (<i>Série c</i>)	49
4.4 - Métodos de ensaio	50
4.4.1 - Preparação dos materiais	50
4.4.2 - Metodologia de produção e de acerto das argamassas	51
4.4.3 - Metodologia de avaliação da retenção da trabalhabilidade	52
4.4.4 - Descrição dos ensaios adotados	53
4.4.4.1 - Ensaio de espalhamento	53
4.4.4.2 - Ensaio de fluidez	56
4.4.5 - Preparação de provetes para ensaios à compressão	57
4.4.6 - Ensaios de compressão	58

Capítulo 5 - Apresentação e discussão dos resultados obtidos

5.1 - Introdução	61
5.2 - Caracterização dos materiais utilizados	61
5.2.1 - Ligantes	61
5.2.2 - Adições	62
5.2.3 - Agregados	63
5.2.4 - Adjuvantes	65
5.3 - Curvas de referência dos agregados finos	65
5.4 - Caracterização da argamassa de referência	66
5.4.1 - Influência das dosagens de água e superplastificante	66
5.4.2 - Avaliação da retenção de trabalhabilidade da argamassa de referência	70
5.5 - Influência do tipo de cimento (<i>Série a</i>)	78
5.6 - Influência da temperatura (<i>Série b</i>)	81
5.6.1 - Argamassa à temperatura de 10°C	81
5.6.2 - Argamassa à temperatura de 22°C	83

5.6.3 - Análise comparativa da <i>Série b</i>	86
5.7 - Influência da dosagem de superplastificante (<i>Série c</i>)	87
5.7.1 - Argamassa com 2% de microssílica	87
5.7.2 - Argamassa com 4% de microssílica	90
5.7.3 - Análise comparativa da <i>Série c</i>	92
5.8 - Resistência à compressão das argamassas produzidas	93
5.9 - Conclusões	95
Capítulo 6 - Conclusões e propostas para trabalhos futuros	
6.1 - Introdução	99
6.2 - Conclusões	99
6.3 - Recomendações para trabalhos futuros	101
Referências Bibliográficas	103
Anexos	
A.1 - Argamassa de referência	109
A.2 - Argamassa com cimento tipo II	115
A.3 - Argamassa com 2% de microssílica	121
A.4 - Argamassa com 4% de microssílica	127

Índice de Figuras

2.1	Método geral proposto por Okamura et al.	8
2.2	Volume de agregados grossos adequados para um betão auto-compactável	9
2.3	Equipamentos para os ensaios de espalhamento e fluidez nas argamassas	11
2.4	Fluxograma para o estudo de composição de betões auto-compactáveis	13
2.5	Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão água /cimento por base de valores afectivos	15
2.6	Curva de referência dos agregados finos	15
2.7	Curva de referência dos agregados grossos	16
2.8	Relação f_{Ad} . vs W/C para as famílias com CEM I 42,5R e fíler calcário	17
2.9	Relação f_{Ad} . vs W/C para as famílias com CEM I 42,5R e fíler granítico	17
2.10	Relação f_{Ad} . vs W/C para as famílias com CEM I 42,5R e cinzas volantes	18
2.11	Relação f_{Ad} . vs W/C para as famílias com CEM II/B-L32,5N e fíler calcário	18
2.12	Relação f_{Ad} . vs W/C para as famílias com CEM II/B-L32,5N e fíler granítico	19
2.13	Relação f_{Ad} . vs W/C para famílias com CEM II/B-L32,5N e cinzas volantes	19
2.14	Intervalo de variação dos parâmetros reológicos adoptados no método de Nepomuceno	20
2.15	Relação V_p/V_s versus V_w/V_p para as famílias com CEM II/B-L32,5N	20
2.16	Relação V_p/V_s versus V_w/V_p para as famílias com CEM I 42,5R	21
2.17	Relação V_w/V_p versus $Sp/p\%$ para as famílias com CEM II/B-L32,5N	21
2.18	Relação V_w/V_p versus $Sp/p\%$ para as famílias com CEM I 42,5R	22
2.19	Modelo matemático para a auto-compactabilidade - “Caixa-L”	26
2.20	Relação entre MN e H2/H1 quando D_m varia entre 630 e 670 mm	26
3.1	Mecanismo de bloqueio	36

4.1	Amostra de fíler de calcário	42
4.2	Amostra de microssílica	42
4.3	Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão W/C	45
4.4	Relação f_{AD} vs W/C para famílias com CEM I 42,5R e fíler de calcário	45
4.5	Medição da temperatura de amassadura	48
4.6	Estufa utilizada para aquecer os materiais	49
4.7	Sequência de amassadura	51
4.8	Misturadora utilizada na produção das argamassas	52
4.9	Betoneira misturadora que equipa o laboratório	53
4.10	Cone do ensaio de espalhamento	54
4.11	Enchimento do cone de ensaio com argamassa	54
4.12	Espalhamento da argamassa	55
4.13	Medição do diâmetro de espalhamento	55
4.14	Enchimento do Funil-V	56
4.15	Pormenor do enchimento do Funil-V	56
4.16	Escoamento da argamassa no Funil-V	57
4.17	Pormenor do escoamento	57
4.18	Exemplo de provetes para ensaios à compressão	58
4.19	Mostrador da câmara de cura	58
4.20	Prensa de ensaios à compressão	59
4.21	Adaptador utilizado na prensa para os ensaios em argamassas	59
5.1	Análise da distribuição das partículas das adições no Coulter LS200 (valor acumulado)	62
5.2	Análise da distribuição das partículas das adições no Coulter LS200 (valor diferencial)	63

5.3	Curvas granulométricas dos agregados finos (areias)	64
5.4	Curvas granulométricas das misturas de agregados finos (real e de referência)	66
5.5	Influência da dosagem de superplastificante nas propriedades reológicas iniciais da argamassa de referência	67
5.6	Dosagens de superplastificante testadas na argamassa de referência	67
5.7	Dosagem de Sp/p% em função de Gm/Rm	68
5.8	Influência da dosagem de água nas propriedades reológicas iniciais da argamassa de referência	69
5.9	Influência da dosagem de água nas propriedades reológicas iniciais da argamassa de referência	69
5.10	Dosagem de Vw/Vp em função de $Rm/(Gm^{0,4})$	70
5.11	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura	71
5.12	Variação da razão Gm/Rm em função do tempo decorrido após amassadura	72
5.13	Variação da razão $Rm/(Gm^{0,4})$ em função do tempo decorrido após amassadura	72
5.14	Variação de Sp/p% em função do tempo após amassadura obtida por estimativa	73
5.15	Variação de Vw/Vp em função do tempo após amassadura obtida por estimativa	74
5.16	Quantidade de água necessária ao longo do tempo após amassadura para repor a trabalhabilidade inicial num betão com a argamassa de referência	75
5.17	Quantidade de superplastificante necessário ao longo do tempo após amassadura para repor a trabalhabilidade inicial num betão com a argamassa de referência	76
5.18	Sp/p% em função do tempo	77
5.19	Vw/Vp em função do tempo	77
5.20	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura	79
5.21	Amassadura com diferentes tipos de cimento vs Gm em função do tempo	80
5.22	Amassadura com diferentes tipos de cimento vs Rm em função do tempo	80
5.23	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura	82
5.24	Temperatura de amassadura vs Gm em função do tempo	82
5.25	Temperatura de amassadura vs Rm em função do tempo	83

5.26	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura	84
5.27	Temperatura de amassadura vs Gm em função do tempo	85
5.28	Temperatura de amassadura vs Rm em função do tempo	85
5.29	Diferentes temperaturas de amassadura vs Gm em função do tempo	86
5.30	Diferentes temperaturas de amassadura vs Rm em função do tempo	86
5.31	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura	88
5.32	Argamassa de referência e Argamassa com 2% de microssílica vs Gm em função do tempo	89
5.33	Argamassa de referência e Argamassa com 2% de microssílica vs Gm em função do tempo	89
5.34	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura	90
5.35	Argamassa de referência e Argamassa com 4% de microssílica vs Gm em função do tempo	91
5.36	Argamassa de referência e Argamassa com 4% de microssílica vs Rm em função do tempo	91
5.37	Argamassa de referência e argamassas com microssílica vs Gm em função do tempo	92
5.38	Argamassa de referência e argamassas com microssílica vs Rm em função do tempo	92
5.39	Todas as argamassas ensaiadas vs Gm em função do tempo	96
5.40	Todas as argamassas ensaiadas vs Rm em função do tempo	96
5.41	Aspecto do provete após ensaio à compressão	97
5.42	Aspecto do provete após ensaio à compressão	97

ANEXOS

A.1	Tentativas para acerto da argamassa de referência	111
A.2	Tentativas para acerto da argamassa com cimento tipo II	117
A.3	Tentativas para acerto da argamassa com 2% de microssílica	123
A.4	Tentativas para acerto da argamassa com 4% de microssílica	129

Índice de Quadros

4.1	Identificação e resumo dos parâmetros da composição da mistura	46
4.2	Resumo da variação de dosagens Vw/Vp	46
4.3	Resumo da variação de dosagens Sp/p%	47
4.4	Identificação e resumo dos parâmetros da composição da mistura (<i>Série a</i>)	47
4.5	Identificação e resumo dos parâmetros da composição da mistura (<i>Série b</i>)	49
4.6	Identificação e resumo dos parâmetros da composição da mistura (<i>Série c</i>)	50
5.1	Massa volúmica e finura dos ligantes	61
5.2	Massa volúmica do Fíler de calcário e microssílica	62
5.3	Finura das adições	62
5.4	Massa volúmica e Absorção de água das areias	63
5.5	Análise granulométrica dos agregados finos	64
5.6	Características do superplastificante	65
5.7	Mistura da curva real e de referência dos agregados finos	65
5.8	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura	71
5.9	Estimativa das razões Vw/Vp e Sp/p% a partir dos parâmetros Gm e Rm	73
5.10	Parâmetros chave do betão auto-compactável de referência	74
5.11	Dosagens para o betão auto-compactável de referência	74
5.12	Variação das dosagens de água e de superplastificante ao longo do tempo após a amassadura	75
5.13	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (<i>Série a</i>)	78
5.14	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (<i>Série b - 10°C</i>)	81
5.15	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (<i>Série b - 22°C</i>)	84
5.16	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (<i>Série c - 2% de microssílica</i>)	88

5.17	Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (<i>Série c - 4% de microssílica</i>)	90
5.18	Valores de carga de rotura e valor médio de resistência à compressão aos 7 dias	94
5.19	Valores de carga de rotura e valor médio de resistência à compressão aos 28 dias	94

ANEXOS

A.1	Parâmetros reológicos para acerto da argamassa de referência	111
A.2	Composição da argamassa de referência (amassadura de 25 litros)	112
A.3	Resistência à compressão da argamassa de referência recolhida após amassadura de 25Lt.	113
A.4	Massa volúmica da argamassa de referência recolhida após amassadura de 25Lt.	113
A.5	Resistência à compressão da argamassa de referência recolhida aos 120 minutos	114
A.6	Massa volúmica da argamassa de referência recolhida aos 120 minutos	114
A.7	Parâmetros reológicos para acerto da argamassa com cimento tipo II	117
A.8	Composição da argamassa com cimento tipo II (amassadura de 25 litros)	118
A.9	Resistência à compressão da argamassa com cimento tipo II, recolhida após amassadura de 25Lt.	119
A.10	Massa volúmica da argamassa com cimento tipo II após amassadura de 25Lt.	119
A.11	Resistência à compressão da argamassa com cimento tipo II recolhida aos 120 minutos	120
A.12	Massa volúmica da argamassa com cimento tipo II recolhida aos 120 minutos	120
A.13	Parâmetros reológicos para acerto da argamassa com 2% microssílica	123
A.14	Composição da argamassa com 2% de microssílica (amassadura de 25 litros)	124
A.15	Resistência à compressão da argamassa com 2% de microssílica (amassadura de 25 litros)	125
A.16	Massa volúmica da argamassa com 2% de microssílica	125
A.17	Parâmetros reológicos para acerto da argamassa com 4% microssílica	129
A.18	Composição da argamassa com 4% de microssílica (amassadura de 25 litros)	130
A.19	Resistência à compressão da argamassa com 4% de microssílica (amassadura de 25 litros)	131
A.20	Massa volúmica da argamassa com 4 % de microssílica	131

Lista de siglas

BAC - Betão auto-compactável

DECA - Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (Portugal)

NP - Norma portuguesa

UBI - Universidade da Beira Interior

Lista de Simbologia

a_i	Percentagem unitária do agregado fino i no volume absoluto do total dos agregados finos (V_s)
D_0	Diâmetro inicial na base do cone no ensaio de espalhamento de argamassas e betões, expresso em mm
D_m	Diâmetro médio de espalhamento no ensaio de espalhamento de argamassas e betões, expresso em mm
$D_{m\acute{a}x.}$	Máxima dimensão do agregado mais grosso, expressa em mm
$f_{Ad.}$	Percentagem unitária da adição no volume absoluto do total de materiais finos da mistura (V_p) (ou percentagem unitária de substituição do cimento pela adição)
f_{c1}	Percentagem unitária do cimento 1 no volume absoluto do total de finos (V_p)
f_{c2}	Percentagem unitária do cimento 2 no volume absoluto do total de finos (V_p)
$f_{cm,28}$	Valor médio da resistência à compressão do betão aos 28 dias de idade, expresso em MPa
f_{cv}	Percentagem unit. de cinzas volantes no volume absoluto do total de finos (V_p)
f_{fc}	Percentagem unitária de fíler calcário no volume absoluto do total de finos (V_p)
f_{fg}	Percentagem unitária de fíler granítico no volume absoluto do total de finos (V_p)
f_{ms}	Percentagem unitária de microssílica no volume absoluto do total de finos (V_p)
G_m	Área de espalhamento relativa no ensaio de espalhamento da argamassa
H_1	Altura do betão na coluna vertical da Caixa-L no final do ensaio e após cessar o movimento do betão, expressa em mm
H_2	Altura do betão na extremidade da Caixa-L no final do ensaio e após cessar o movimento do betão, expressa em mm
H_2/H_1	Razão entre a altura do betão na extremidade da Caixa-L (H_2) e na coluna vertical (H_1), no final do ensaio e após cessar o movimento do betão
K_{sf}	Percentagem unitária do volume de material fino presente na unidade de volume do agregado fino
MF	Módulo de finura
MN	Número de mistura que designa o produto do parâmetro (V_p/V_s) pelo parâmetro (V_m/V_g)
MS	Massa da microssílica na mistura, em kg/m^3

Rm	Velocidade relativa de escoamento no ensaio de fluidez da argamassa, em s^{-1}
Sp/p	O mesmo que Sp/p%
Sp/p%	Razão percentual em massa entre as quantidades totais de superplastificante e de materiais finos na mistura
t	Tempo de escoamento no ensaio de fluidez de argamassas e betões, expresso em segundos
V _{C1}	Volume absoluto do cimento 1 na mistura, em m^3/m^3
V _{C2}	Volume absoluto do cimento 2 na mistura, em m^3/m^3
V _{CV}	Volume absoluto das cinzas volantes na mistura, em m^3/m^3
V _{FC}	Volume absoluto do filer calcário na mistura, em m^3/m^3
V _{FG}	Volume absoluto do filer granítico na mistura, em m^3/m^3
Vg	Volume absoluto do total de agregados grossos da mistura, em m^3/m^3
Vg,lim	Volume aparente de agregado grosso compactado, isto é, o volume do total das partículas de agregado grosso seco compactado na unidade de volume (ou razão entre a baridade compactada e a massa volúmica do total de agregado grosso)
V _{G1}	Volume absoluto do agregado grosso 1 na mistura, em m^3/m^3
V _{G2}	Volume absoluto do agregado grosso 2 na mistura, em m^3/m^3
V _i	Volume absoluto do material i na mistura, em m^3/m^3
V _m	Volume absoluto da argamassa na mistura, em m^3/m^3
V _{m/Vg}	Razão em volume absoluto entre as quantidades de argamassa e de agregados grossos na mistura
V _{MS}	Volume absoluto da microsílica na mistura, em m^3/m^3
V _p	Volume absoluto do total de material fino, em m^3/m^3
V _{p/Vs}	Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de materiais finos e de agregados finos na mistura
V _s	Volume absoluto do total de agregados finos, em m^3/m^3
V _{S1}	Volume absoluto do agregado fino 1 na mistura, em m^3/m^3
V _{S2}	Volume absoluto do agregado fino 2 na mistura, em m^3/m^3
V _{sp}	Volume de superplastificante da mistura, em m^3/m^3

V_{sp}/V_p	Razão em volume absoluto entre as quantidades de superplastificante e de materiais finos na mistura
V_v	Volume de vazios da mistura, em m^3/m^3
V_w	Volume de água da mistura, em m^3/m^3
V_w/V_p	Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de água e de materiais finos na mistura
W	Volume de água na mistura, em l/m^3
W/C	Razão em massa entre as quantidades de água e de cimento da mistura
$\Delta(Sp/p\%)$	Variação da razão $(Sp/p\%)$ face ao valor inicial calculado para a mistura
$\bar{\delta}_i$	Massa volúmica do material i , expressa em kg/m^3

Capítulo 1- Introdução

1.1 - Enquadramento do tema

Cada vez mais, a indústria da construção civil denota uma exigência crescente para com todos os seus intervenientes, sejam engenheiros, construtores ou simples operários. Aos primeiros, em particular, exige-se uma adequada definição dos métodos de produção e controle, que decorre desde a selecção dos materiais ao produto final em obra.

No que respeita à produção do betão convencional vibrado, usado em elementos estruturais, exige-se um controlo apertado e rigoroso em todas as suas fases, passando pela selecção dos materiais, estudo da composição, produção, transporte, colocação, compactação e cura. Cada uma das fases descritas pode envolver diferentes intervenientes. Por exemplo, o betão pode ser calculado, produzido, transportado e colocado em obra pelo produtor de uma central de betão bem equipada e com um controlo de qualidade apertado, mas, em última análise, cabe ao construtor garantir a adequada compactação em obra e respectiva cura. A compactação e a cura exigem igualmente mão-de-obra especializada, o que nem sempre acontece, pondo em risco a qualidade e o desempenho do betão no estado endurecido, nomeadamente a durabilidade e a resistência.

A situação descrita no parágrafo anterior é em tudo semelhante à ocorrida no Japão na década de 80, onde se verificou uma acentuada redução na mão-de-obra especializada, em particular nos trabalhos de compactação do betão convencional vibrado, com o conseqüente decréscimo da qualidade final da construção. Em consequência, surgiu a necessidade de se desenvolver um novo e sofisticado betão para inverter a situação [23]. Foi então que em 1986 o Professor Hajime Okamura e os seus colaboradores introduziram no Japão o designado betão auto-compactável, com o objectivo de garantir uma melhor homogeneidade do betão e melhorar a durabilidade nas estruturas, independentemente dos trabalhos de compactação do betão [23]. Este novo tipo de betão caracteriza-se por uma elevada fluidez e homogeneidade, mas principalmente pelo facto de, através do seu peso próprio, conseguir passar entre as armaduras preenchendo totalmente as cofragens sem vibração, mantendo toda a sua homogeneidade e conferindo à estrutura boa resistência e durabilidade.

A trabalhabilidade do betão auto-compactável durante o enchimento das cofragens em obra é determinante para a maior ou menor compacidade do produto final, uma vez que este betão é aplicado sem qualquer vibração ou outra forma de compactação. Uma insuficiente auto-compactabilidade aquando da colocação do betão nas cofragens não poderá ser compensada por trabalho adicional em obra e pode comprometer seriamente as suas propriedades no

estado endurecido [25]. O estudo da composição de um betão auto-compactável deverá por isso ter em conta as diferentes fases que envolvem a produção e manuseamento do material.

Tem sido referido que os processos de produção, transporte e colocação do betão auto-compactável podem afectar as suas propriedades no estado fresco e que, comparativamente com um betão corrente, a trabalhabilidade deste tipo de betões é mais sensível à variação dos materiais, variações na dosagem de água, sequência e duração da amassadura, temperatura ambiente, condições e duração do transporte, condições de colocação, etc. [4, 15, 25, 27, 29, 31, 32]. Por esse motivo, é considerado essencial implementar-se um rigoroso controlo de qualidade em todas as fases de produção e manuseamento do material.

No processo de produção, tem sido referido como essencial, o controlo da dosagem efectiva de água na mistura. Especial atenção deverá ser dada ao teor em água superficial dos agregados finos, os quais poderão transportar água para o betão. A distribuição granulométrica dos agregados finos deverá ser também inspeccionada com regularidade [15, 27, 29]. Outros factores importantes incluem a selecção do tipo de betoneira, definição da ordem de entrada dos materiais e o tempo de amassadura [4, 6, 15, 27, 32].

No processo de transporte deverá observar-se qualquer possível efeito de segregação dos agregados, mas especialmente relevante será a avaliação da retenção da trabalhabilidade durante o tempo em que decorre esse transporte [5, 15, 31]. Vários estudos têm demonstrado que a retenção de trabalhabilidade é afectada pelas propriedades de cada componente da argamassa e pela interacção física e química entre eles [28,1]. O tipo e dosagem de superplastificante podem também afectar a retenção da trabalhabilidade [2]. Em todo o processo de aplicação do BAC a fase do transporte é fundamental. Esta etapa será afectada por vários factores e, normalmente, só se pode prolongar durante um período máximo de 2 horas, de forma a manter inalteráveis todas as características deste material.

A colocação é feita normalmente por bombagem. Existem indicações de que a pressão de bombagem poderá afectar a trabalhabilidade do betão se este não possuir adequada resistência à segregação [4, 31]. Acima de determinados valores, que dependem da taxa de armaduras e da forma das cofragens, a altura de queda, a distância de colocação horizontal e a taxa de betonagem poderão também afectar a trabalhabilidade do betão fresco [4, 31].

Quando se analisam as propriedades do betão auto-compactável, é possível simplificar essa análise dividindo o estudo das propriedades em duas fases distintas: fase de argamassa e fase de betão [18]. A avaliação das propriedades da argamassa é uma parte integrante de muitos processos de concepção do betão auto-compactável e, portanto, é muito útil conhecer as propriedades da argamassa. Pode até dizer-se que as propriedades da argamassa são dominantes, visto que no BAC o teor de agregados grosso (31-35% em volume) diminui significativamente quando comparado com o betão convencional [28,1].

No betão auto-compactável, a fase de argamassa proporciona a lubrificação entre as partículas do agregado grosso, o que vai conferir uma maior estabilidade ao betão em geral. As propriedades exigidas à fase argamassa são semelhantes às do betão em si, ou seja, esta necessita de ter uma tensão inicial de corte relativamente baixa para facilitar o escoamento e uma viscosidade plástica moderada para prevenir a segregação. Contudo, o fluxo não pode ser demasiado lento para que o escoamento se dê em condições ideais [14]. As propriedades reológicas da argamassa apresentam uma boa correlação com as propriedades reológicas do BAC [18] e, por esse facto, é possível estabelecer-se as propriedades reológicas da argamassa que conduzem às propriedades reológicas adequadas para o BAC.

As propriedades reológicas adequadas do BAC são condição necessária, mas não suficiente para se atingir a auto-compactabilidade. Alguns parâmetros da auto-compactabilidade só podem ser avaliados em betões, nomeadamente a capacidade de passagem em aberturas estreitas e a resistência ao bloqueio ou a resistência à segregação. No entanto, quando se avalia estritamente a retenção da trabalhabilidade, o comportamento do betão será fortemente condicionado pela fase argamassa, pelo que essa análise pode ser feita na fase argamassa em vez de se fazer na fase betão.

1.2 - Objectivos e justificação do tema proposto

A presente dissertação teve como principal objectivo a caracterização da trabalhabilidade inicial (logo após a amassadura) e a análise da retenção de trabalhabilidade ao longo do tempo em betões auto-compactáveis. Para além do factor tempo, pretendeu-se avaliar a influência do tipo de cimento, da temperatura do betão e da dosagem de superplastificante. Os parâmetros seleccionados para análise têm sido identificados como fundamentais na análise da retenção da trabalhabilidade do betão auto-compactável, mas a sua selecção teve também em consideração os recursos do Laboratório de Tecnologia e Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da UBI e o horizonte temporal de realização da dissertação.

Para a concretização dos objectivos preconizados, estabeleceu-se que o estudo laboratorial seria realizado em argamassas adequadas à produção de betões auto-compactáveis pelas razões já descritas. Inicialmente, através do método de Nepomuceno [18], procedeu-se ao acerto de uma argamassa que serviu como referência à investigação. O intuito foi o de avaliar esta argamassa de modo a perceber o seu comportamento reológico ao longo do tempo e, a partir daí, explorar a influência dos outros parâmetros seleccionados na retenção de trabalhabilidade das argamassas, nomeadamente, a influência do tipo de cimento, da temperatura de amassadura e da dosagem de superplastificante.

As propriedades reológicas das diferentes argamassas produzidas em laboratório foram exhaustivamente avaliadas de forma indirecta através dos ensaios de espalhamento (slump-flow) e de escoamento (Funil-V). Estas propriedades foram medidas em diferentes períodos após a amassadura para possibilitar a avaliação do comportamento das mesmas ao longo do tempo e perceber melhor o processo que o betão enfrenta desde a sua amassadura até à sua colocação em obra. Salienta-se que os resultados e análises deste trabalho são válidos apenas para as argamassas experimentalmente ensaiadas, representando assim uma pequena janela no vasto universo do betão auto-compactável.

Os resultados obtidos no presente trabalho experimental proporcionaram a apresentação de uma análise comparativa e crítica da influência relativa dos vários parâmetros seleccionados, através de comparações com a argamassa de referência e com os resultados obtidos em outros estudos similares, resultando assim uma análise final coerente.

Como se referiu anteriormente, a fase de amassadura do BAC deve ser um processo de alta precisão, pois só assim, será possível alcançar a auto-compactabilidade desejada. Contudo, depois de concluída esta fase, o betão enfrenta um dos seus maiores desafios até à sua colocação em obra, o transporte. É durante o transporte que o BAC é colocado realmente à prova, isto porque existem vários factores a ter em conta que podem comprometer a auto-compactabilidade que caracteriza este produto. É neste ponto fundamental que esta dissertação pretende intervir, de modo a avaliar a influência que alguns parâmetros seleccionados para este trabalho podem exercer na maior ou menor capacidade de retenção da trabalhabilidade do betão auto-compactável. Pretende-se então, através de ensaios reológicos ao longo do tempo, simular este processo e avaliá-lo convenientemente.

1.3 - Organização do trabalho

A presente dissertação subdivide-se em três partes: pré-textual, textual e referencial.

A parte pré-textual inclui o âmbito do trabalho, dedicatória, agradecimentos, resumo analítico, índice geral, índice de figuras e de quadros, listagem de siglas e da simbologia utilizada.

A parte textual, que representa o “*corpo*” do trabalho, encontra-se estruturada em 6 Capítulos, cujo conteúdo inclui a introdução, a revisão bibliográfica, a descrição do programa experimental, a apresentação e discussão dos resultados e, finalmente, as conclusões e propostas para trabalhos futuros. O conteúdo destes capítulos é a seguir descrito com mais detalhe:

- No Capítulo 1 é feita a introdução ao tema tratado, são apresentados os objectivos, é justificada a importância do tema proposto e é descrita a organização geral do trabalho.

- No Capítulo 2, denominado por “*Os métodos de dosagem que utilizam a fase argamassa e a fase betão*”, inclui-se a revisão bibliográfica dos métodos de cálculo da composição do BAC, limitando essa revisão aos métodos propostos por Okamura e por Nepomuceno, por estes se adequarem melhor aos objectivos da análise proposta, uma vez que ambos preconizam o estudo da composição do betão em duas fases, nomeadamente, a fase argamassa e a fase betão.

- O Capítulo 3, dá um especial ênfase ao fenómeno da retenção da trabalhabilidade e contextualiza o mesmo.

- O Capítulo 4 é reservado à descrição do programa experimental, onde se apresentam todos os procedimentos experimentais realizados na produção e caracterização das argamassas para betão auto-compactável.

- No Capítulo 5 é feita a apresentação e discussão dos resultados obtidos, confrontando esses resultados com a revisão bibliográfica efectuada.

- No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

Por último, a parte referencial inclui todas as referências bibliográficas citadas nesta dissertação e todos os anexos.

Capítulo 2- Os métodos de dosagem que utilizam a fase argamassa e a fase betão

2.1- Introdução

O objectivo principal desta dissertação é analisar o fenómeno da retenção da trabalhabilidade nos betões auto-compactáveis. Para tal, deve começar-se por perceber as especificidades deste “novo” tipo de betão e os modelos de estudo da composição, em especial aqueles que viabilizam o estudo da retenção da trabalhabilidade a partir da fase argamassa.

Como referido anteriormente, foi no ano de 1986, pela “mão” do Professor Okamura e seus colaboradores, que surgiu no Japão o protótipo do betão auto-compactável e na sua sequência o primeiro método de estudo da composição proposto por Okamura e que ficou conhecido como “Método geral”. Durante a década seguinte, surgiram no Japão várias investigações que envolveram universidades, grandes empresas de construção e produtores de materiais, com o intuito de desenvolver e aperfeiçoar o betão auto-compactável [18]. Na Europa esta tecnologia apenas se começou a expandir de forma significativa nesta última década, e para tal, muito contribuíram países como a Suécia, Holanda, entre outros. No caso concreto de Portugal, são ainda pouco significativas as aplicações de betão auto-compactável em obras correntes, talvez devido ao facto de ser ainda uma tecnologia pouco rentável quando comparada com o uso do betão corrente.

Hoje em dia, já existem vários métodos propostos para o cálculo das proporções das misturas dos betões auto-compactáveis. Nesta dissertação vão ser expostos dois desses métodos, o método de Okamura, conhecido também como método geral, e o método de Nepomuceno, que foi formulado pelo professor que orienta esta dissertação. Vai ser possível notar que estes dois métodos propõem abordagens distintas no que respeita a metodologia a adoptar, mas ambos suportam-se nos estudos da fase argamassa.

2.2- Métodos de estudo da composição do BAC

O comportamento do betão auto-compactável no estado fresco assume uma importância ainda maior quando comparado com o betão convencional, isto porque as características físicas e químicas neste estado influenciam de forma determinante a capacidade de auto-compactação do betão [13].

Os materiais usados na elaboração deste “novo” betão são, em geral, os mesmos utilizados no betão dito convencional. No entanto, para assegurar uma produção uniforme e controlada do betão auto-compactável é necessário um especial cuidado na selecção dos materiais [13].

De entre os vários métodos existentes para o estudo da composição do betão auto-compactável, seleccionaram-se para análise neste trabalho apenas aqueles que dividem esse estudo em duas fases, a fase argamassa e a fase betão. O interesse particular por estes métodos deve-se ao facto de se ter optado por avaliar as propriedades de retenção da trabalhabilidade através da fase argamassa.

2.2.1-Método de Okamura

O método proposto pelo professor Okamura e seus colaboradores ficou conhecido por “Método geral” e resultou de um extenso trabalho realizado na Universidade de Tóquio. Este método destaca-se principalmente pela sua extrema simplicidade, podendo ser implementado seguindo a “receita” que se encontra exemplificada no fluxograma da Figura 2.1.

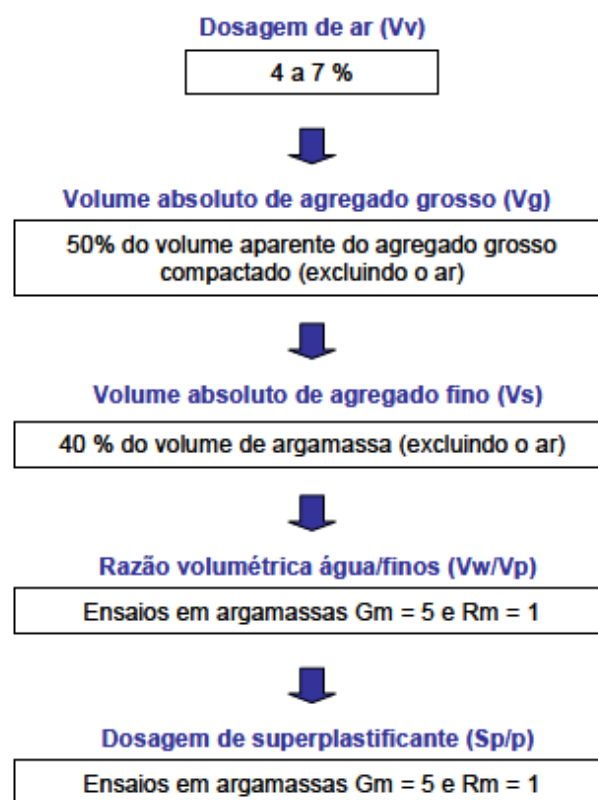


Figura 2.1 - Método geral proposto por Okamura et al. [18]

Este método foi inicialmente concebido para misturas de betão auto-compactável com materiais Japoneses, incluindo agregados grossos cuja máxima dimensão varia entre 5 mm e 20 mm, agregados finos com a dimensão máxima de 5 mm e um cimento portland de baixo calor de hidratação. Neste método foi excluído o uso de agentes de viscosidade.

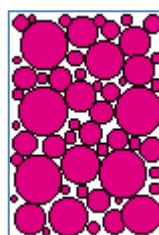
A auto-compactabilidade no método geral é determinada acima do valor que seria necessário, o que o torna num método tido como conservador. Não obstante, este facto permite que a auto-compactabilidade seja atingida facilmente, independentemente de ocorrerem pequenas variações durante o processo de produção. Em termos de limitações, poderá referir-se a ausência de referência relativamente ao nível de resistência à compressão do betão como dado essencial para a formulação da composição. No entanto, a baixa razão água/cimento imposta pelo método para cumprir os requisitos de betão fresco, proporcionam no final resistências adequadas à maioria das estruturas correntes.

2.2.1.1- Volume de ar

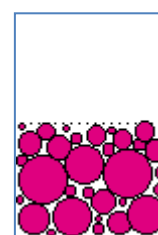
O volume de ar (V_v) deve estar compreendido entre 4% e 7%, proporcionando um aumento da resistência à acção do gelo/degelo.

2.2.1.2- Agregados grossos

O volume absoluto de agregados grossos (V_g) representa aproximadamente 50% do volume ocupado pelas partículas de agregado grosso compactado na unidade de volume aparente de 1 m^3 , excluindo o volume de ar previsto anteriormente, ver Figura 2.2 [18,30,22].



Volume aparente = $1,0\text{m}^3$



Volume aparente = $0,5\text{m}^3$

Figura 2.2 - Volume de agregado grosso adequado para um betão auto-compactável [22]

O volume ocupado pelas partículas de agregado grosso compactado na unidade de volume aparente de 1 m^3 ($V_{g,lim}$) é equivalente à razão entre o valor da baridade compactada e o

valor da massa volúmica do agregado. Pode então definir-se o volume de agregado grosso a utilizar, como sendo (Equação 2.1):

$$Vg = 0,5 \times Vg, \text{lim.} (1 - Vv) \quad (2.1)$$

Em que:

Vg é o volume de agregado grosso para a mistura, em m^3/m^3 ;

Vv é o volume de ar (vazios) previsto para a mistura, em m^3/m^3 ;

Vg, lim é o volume aparente de agregado grosso compactado, em m^3/m^3

A quantidade de agregado grosso depende das suas características físicas, tais como a distribuição granulométrica e a forma das partículas, que condicionam a compacidade de uma dada massa de agregado compactado. Quanto mais contínua for a granulometria menor será o volume de vazios (maior compacidade), logo maior será o valor da baridade, permitindo, desta forma, maior quantidade de agregado grosso na composição de um BAC.

2.2.1.3- Agregados finos

O volume absoluto de agregados finos (V_s) representa 40% do volume de argamassa que constitui o betão, excluindo o volume de vazios. As partículas de agregados finos devem variar entre os 0,09 mm e os 5 mm. As partículas com dimensão inferior a 0,09 mm são incluídas na parcela dos materiais finos e não do agregado fino. Através da distribuição granulométrica da areia é possível determinar a percentagem de partículas nestas condições, designada por k_{sf} [18]. Sabendo a percentagem de material fino presente no agregado fino através da distribuição granulométrica, o volume absoluto de agregado fino a utilizar na mistura é dado pela Equação 2.2:

$$V_s = \frac{0,4 \times (1 - Vv - Vg)}{1 - k_{sf}} \quad (2.2)$$

Em que:

V_s é o volume de agregados fino na mistura, em m^3/m^3 ;

Vv é o volume de ar previsto para a mistura, em m^3/m^3 ;

Vg é o volume de agregado grosso para a mistura, em m^3/m^3 ;

k_{sf} é a percentagem unitária do volume de material fino presente na unidade de volume de agregado fino.

Uma quantidade muito alta de agregados finos pode fazer com que as partículas interfiram umas com outras causando bloqueio durante o escoamento. Por outro lado, uma quantidade muito baixa de agregados finos resulta numa quantidade necessariamente elevada de cimento e de água, o que seria prejudicial para o betão no estado endurecido [22].

2.2.1.4- Razão volumétrica água/finos e dosagem de superplastificante

No betão auto-compactável a razão água/finos tem que ser definida de modo a cumprir todas as exigências que levem à auto-compactabilidade [18,22]. Neste método, a única forma de controlar a resistência à compressão é através das combinações de diferentes materiais finos.

Este método prevê que a razão volumétrica água/finos e a dosagem de superplastificante sejam determinadas a partir de ensaios em argamassas no estado fresco, com o objectivo de obter determinados parâmetros reológicos [18,30,22]. Estes parâmetros são obtidos através da realização do ensaio de espalhamento (slump-flow) e do ensaio de fluidez (funil-V), como se ilustra na Figura 2.3.

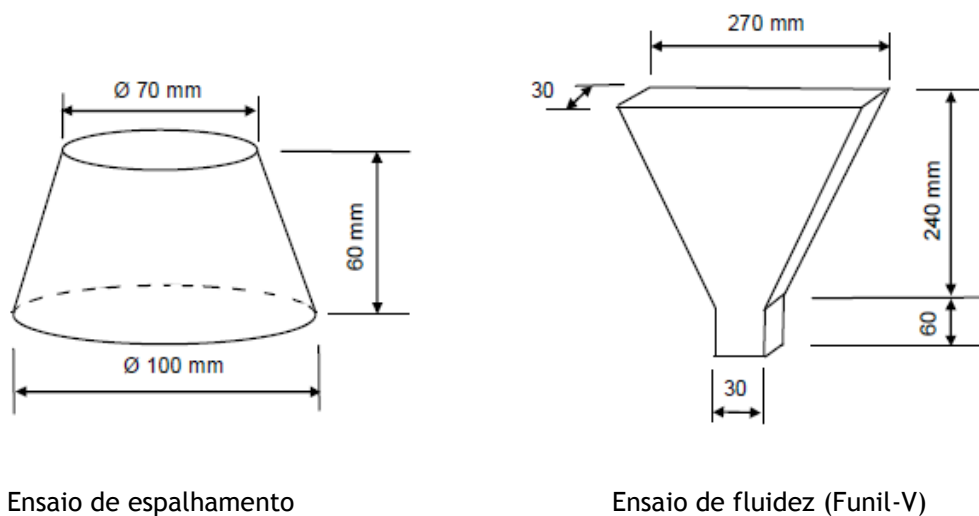


Figura 2.3 - Equipamentos para os ensaios de espalhamento e de fluidez nas argamassas [5]

O ensaio de espalhamento inicia-se com a colocação do molde tronco-cônico sobre uma superfície lisa e limpa. Em seguida enche-se o molde com argamassa sem qualquer tipo de compactação e, finalmente, levantando o molde, a argamassa espalha-se em forma circular. Após cessar o movimento da argamassa é realizada a medição do diâmetro em duas direcções perpendiculares entre si e determina-se o seu valor médio (D_m) [18,30,22].

No ensaio de fluidez, o funil-V é nivelado e completamente cheio com argamassa, sem qualquer tipo de compactação. Em seguida é aberta a comporta que se encontra na base do

funil, iniciando-se então o escoamento da argamassa. É precisamente neste instante que se coloca o cronómetro a contar. A contagem deve terminar logo que, olhando de cima para baixo pelo interior do funil, se consiga vislumbrar o primeiro raio de luz. O tempo decorrido em segundos é o resultado do ensaio.

O resultado do ensaio de espalhamento pode ser expresso pela área de espalhamento relativa (Gm) de acordo com a Figura 2.3, enquanto que o ensaio de fluidez pode ser expresso em termos de velocidade relativa de escoamento (Rm) de acordo com a Figura 2.4.

$$Gm = \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 - 1 \quad (2.3)$$

Em que:

D_m é o diâmetro médio de espalhamento, em mm;

D_0 é o diâmetro inicial na base do cone, em mm.

$$Rm = \frac{10}{t} \quad (2.4)$$

Em que:

T é o tempo de escoamento no Funil-V, em segundos.

O valor do parâmetro Gm é um indicador de deformabilidade, enquanto que o parâmetro Rm é um indicador de fluidez que representa a velocidade de deformação. Estes parâmetros (Gm e Rm) apresentam uma óptima correlação com os parâmetros reológicos, respectivamente, tensão de corte e viscosidade plástica [19].

No Método Geral, para se considerar um betão auto-compactável tem que se obter em simultâneo $Gm = 5$ e $Rm = 1$. Para tal, fixa-se a percentagem de agregados finos em 40% e ajusta-se experimentalmente a razão de água/(materiais finos) e a dosagem de superplastificante (Sp/p) até ser conseguido o “equilíbrio” necessário [18,30,22]. Após a adequada definição dos parâmetros para as argamassas, procede-se à execução da mistura.

Nos betões, os parâmetros reológicos são avaliados de forma semelhante e com recurso aos mesmos ensaios, embora, as dimensões do tronco-cónico do ensaio de espalhamento e as dimensões do Funil-V do ensaio de fluidez sejam diferentes. Os procedimentos são idênticos aos referidos anteriormente para as argamassas.

O diâmetro de espalhamento do betão no ensaio do tronco-cónico é considerado válido caso esteja compreendido entre os 600 mm e os 700 mm, podendo, para tal, recorrer-se ao uso de superplastificante de modo a “moldar” o betão dentro deste intervalo. Por outro lado, o tempo de escoamento no Funil-V deverá estar entre os 10 e os 20 segundos para que seja cumprido o critério de velocidade de deformação [18,30,22].

2.2.2-Método de Nepomuceno

Nepomuceno [18], na sua tese de Doutoramento, apresenta uma proposta diferente para o estudo da composição de betões auto-compactáveis. No fluxograma da Figura 2.4 é possível vislumbrar que este método é composto por quatro principais etapas: definição dos dados essenciais de base, definição das opções de base em relação aos materiais, estudo em argamassas e, por fim, estudo em betões.

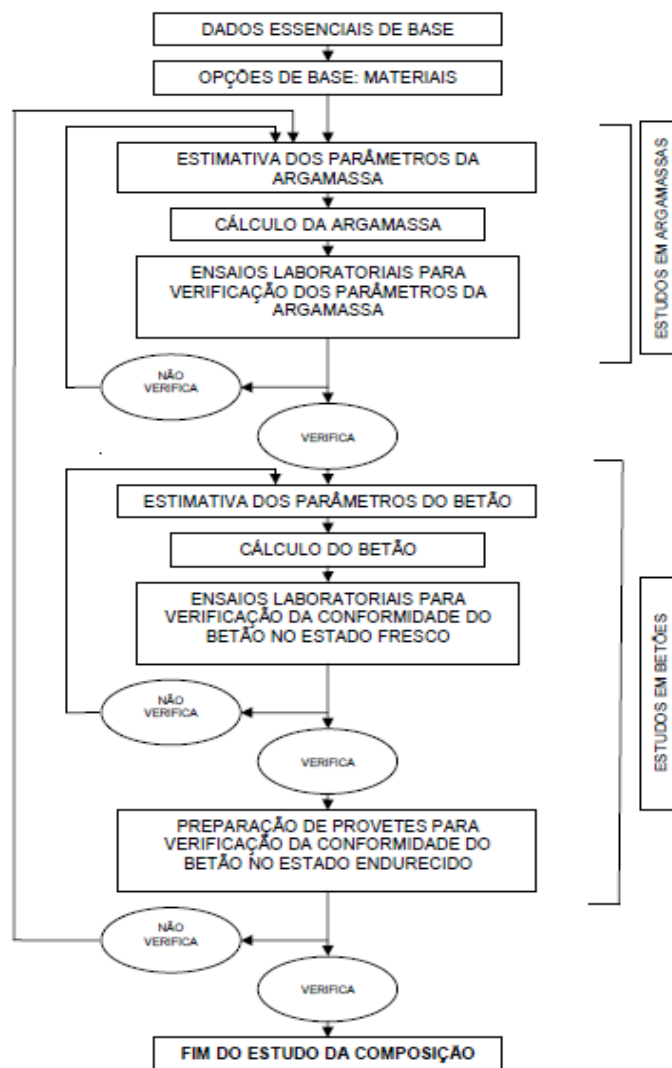


Figura 2.4 - Fluxograma para o estudo de composição de betões auto-compactáveis [18]

2.2.2.1- Dados essenciais de base

Esta etapa inicial tem grande importância. É nesta etapa que se definem as propriedades que se pretendem para o betão auto-compactável, quer no seu estado fresco, quer no estado endurecido. São considerados também todos os elementos que podem condicionar a escolha dos materiais e o estudo da composição do betão.

No estado endurecido, a metodologia proposta por Nepomuceno [18] contempla apenas a resistência à compressão, apresentada no seu valor médio aos 28 dias ($f_{cm,28}$). Os parâmetros de durabilidade impostos pela classe de exposição, tal como acontece nos betões correntes, podem ser deduzidos com recurso a razão água/cimento ou à dosagem mínima de cimento.

No que respeita ao estado fresco, de modo a atingir a auto-compactabilidade, este método adopta para os agregados grossos a dimensão máxima de 19,1 mm e nos ensaios de auto-compactabilidade propõe espaçamentos entre varões reduzidos, de forma a aumentar o grau de exigência.

2.2.2.2- Opções de base: materiais

Para se utilizar correctamente as correlações apresentadas neste método, a escolha dos materiais deveser a seguinte:

- Os ligantes devem ser cimentos: CEM II/B-L32,5 ou CEM I 42,5R
- As adições minerais a utilizar deverão ser: cinzas volantes, fíler calcário ou fíler granítico.
- Superplastificante: deve ser utilizado de preferência o Sika ViscoCrete-3000, caso a escolha recaia sobre outro tipo de superplastificante, deve ter-se o cuidado que este possua a mesma base química que o referido anteriormente.

Recomenda-se a utilização deste método apenas para associações binárias, ou seja, envolvendo apenas um dos cimentos e uma das adições. O cimento escolhido deverá ter em conta a resistência à compressão pretendida através da análise das correlações entre a resistência à compressão aos 28 dias e a razão água/cimento, como ilustra a Figura 2.5 [18].

Quanto aos agregados finos a utilizar, a escolha pode ser vasta, sendo apenas necessário que a curva de referência do conjunto de agregados finos escolhidos seja muito próxima da curva definida por este método, ilustrada na Figura 2.6 [18].

Tal como os agregados finos, também a escolha dos agregados grossos pode ser sobre qualquer material britado, desde que a sua curva de referência seja muito próxima daquela definida por este método, ilustrada na Figura 2.7 [18].

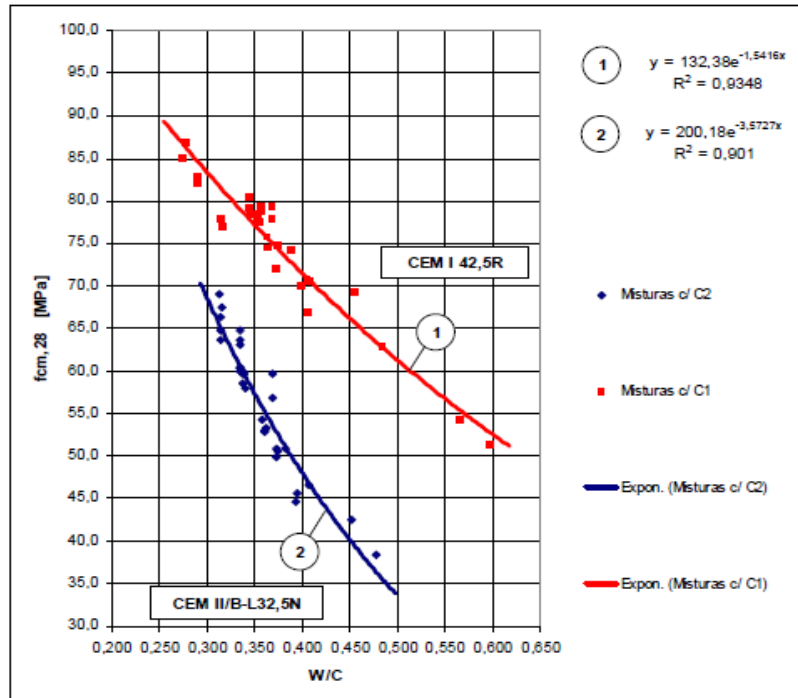


Figura 2.5 - Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão água/cimento por base de valores afectivos [18]

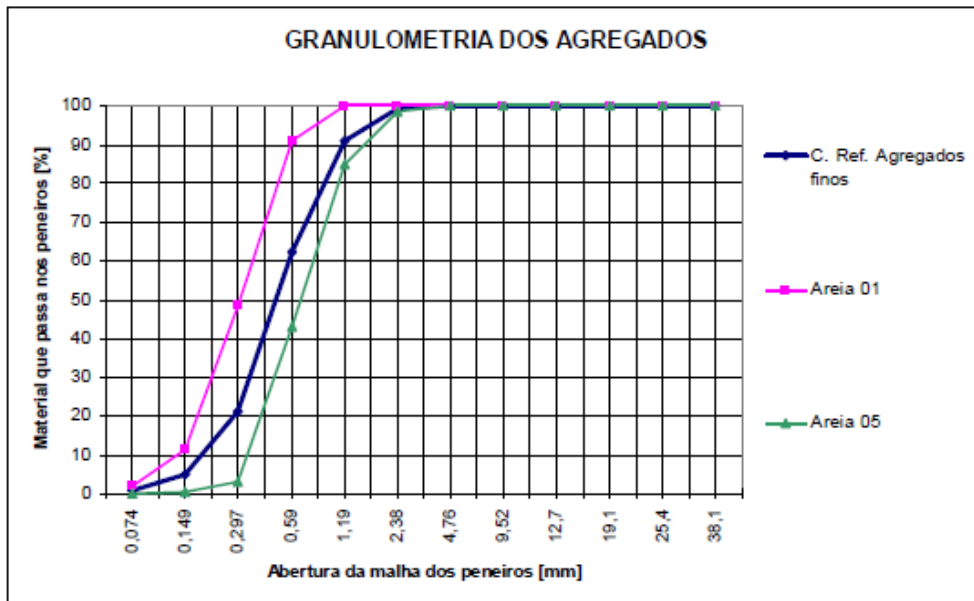


Figura 2.6 - Curva de referência dos agregados finos [18]

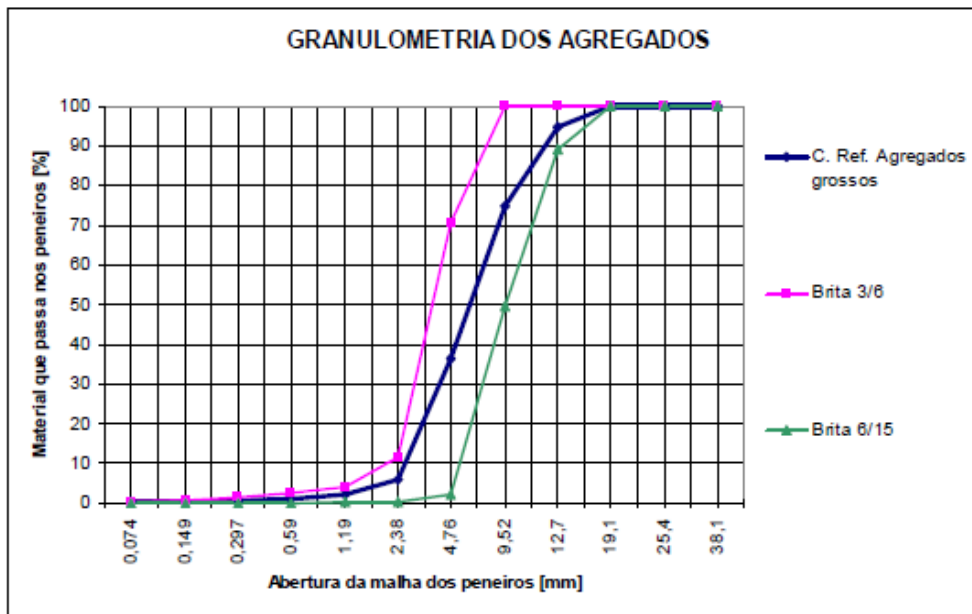


Figura 2.7 - Curva de referência dos agregados grossos [18]

2.2.2.3- Estudos em argamassas

No estudo em argamassas, o primeiro passo necessário é a definição da razão água/cimento (W/C), de acordo com a resistência pretendida para o betão. Neste método a razão W/C para as argamassas é igual à razão W/C para os betões. Consultando a curva de referência da Figura 2.5 e sabendo a resistência pretendida é possível apurar a razão W/C adequada para o tipo de cimento escolhido [18]. Seguidamente, deve adoptar-se um valor para a razão volumétrica (V_p/V_s). O valor desta razão deve estar compreendido entre 0,6 e 0,8, mas recomenda-se que esse intervalo seja reduzido a 0,65 e 0,8.

Definido o parâmetro (V_p/V_s) e a razão água/cimento (W/C) da argamassa, determina-se a percentagem de substituição do cimento pela adição recorrendo às correlações desenvolvidas por Nepomuceno [18], que se apresentam da Figura 2.8 à Figura 2.13.

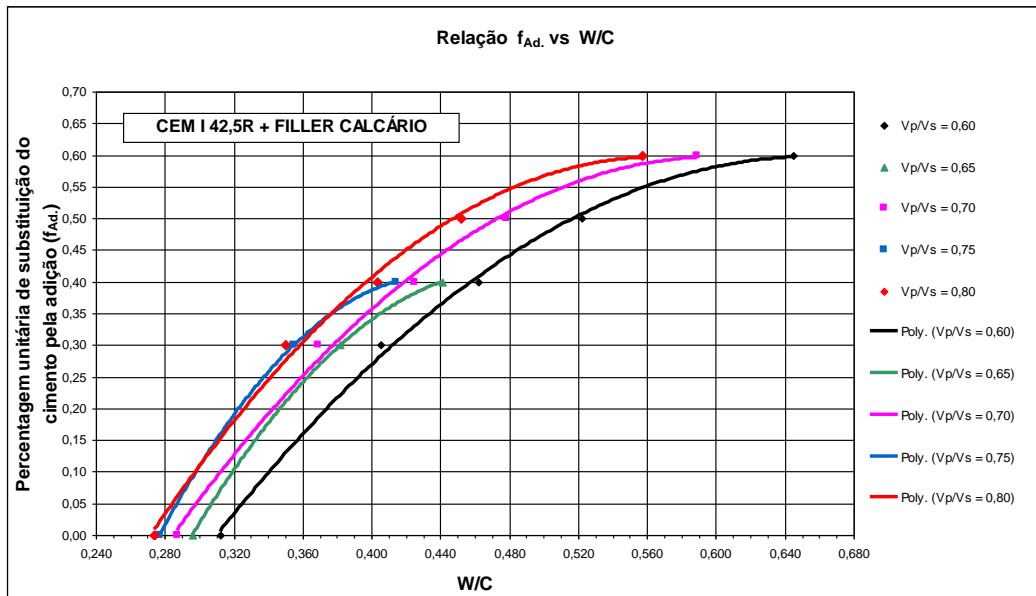


Figura 2.8 - Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM I 42,5R e filler calcário

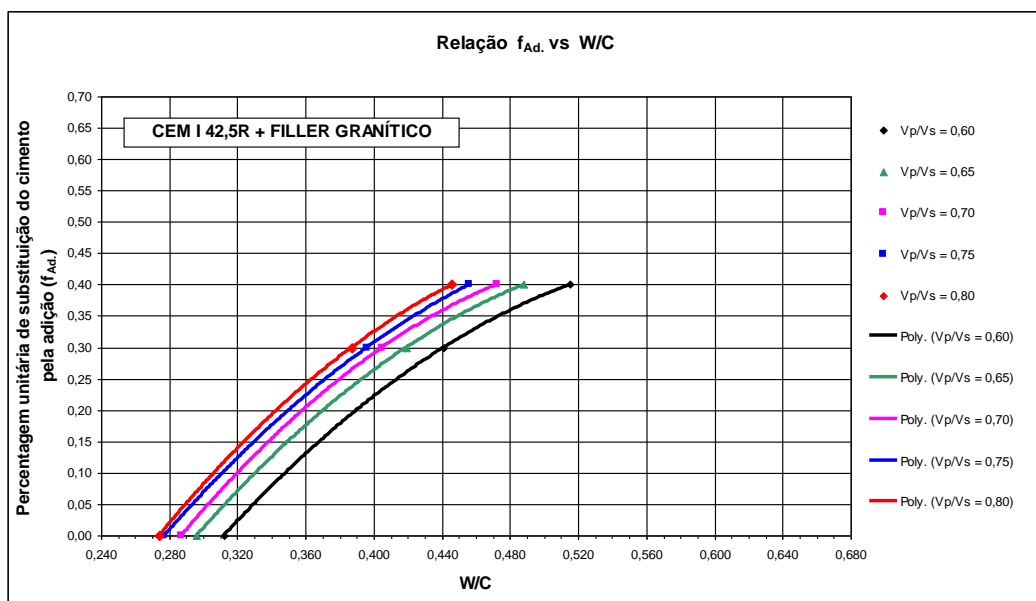


Figura 2.9 - Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM I 42,5R e filler granítico

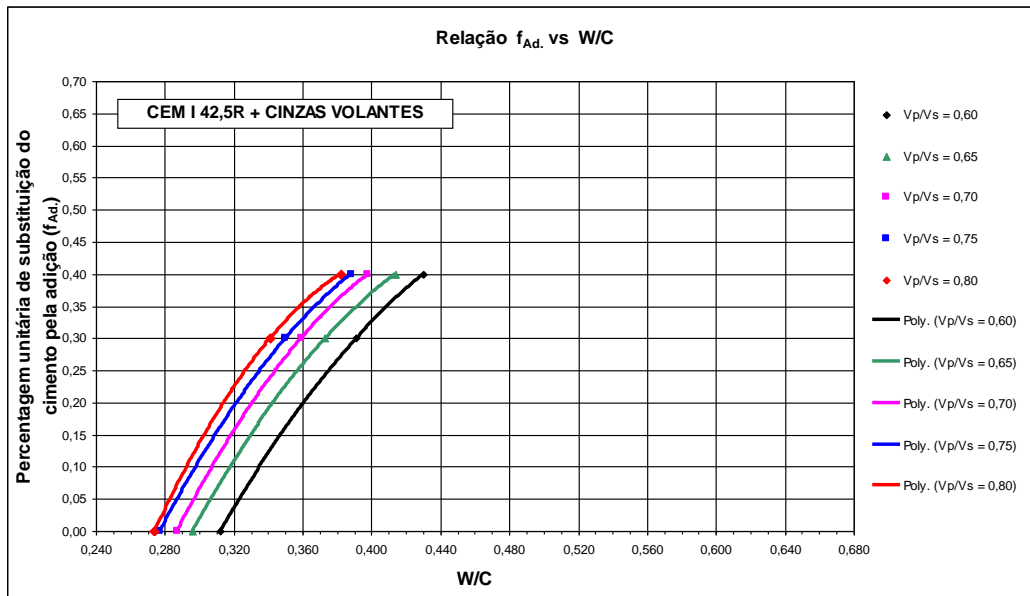


Figura 2.10 - Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM I 42,5R e cinzas volantes

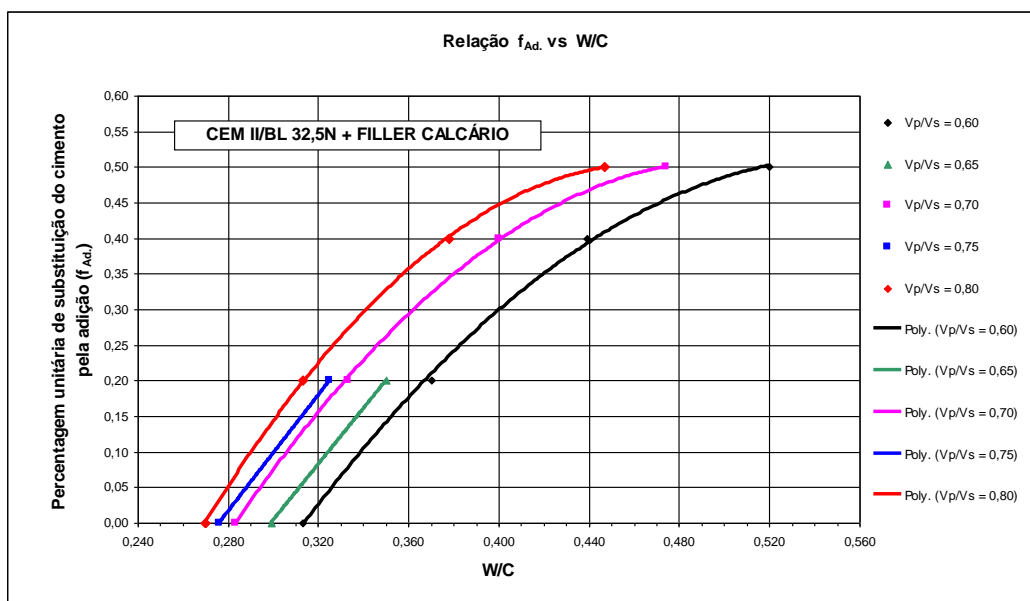


Figura 2.11 - Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM II/B-L32,5N e fíler calcário

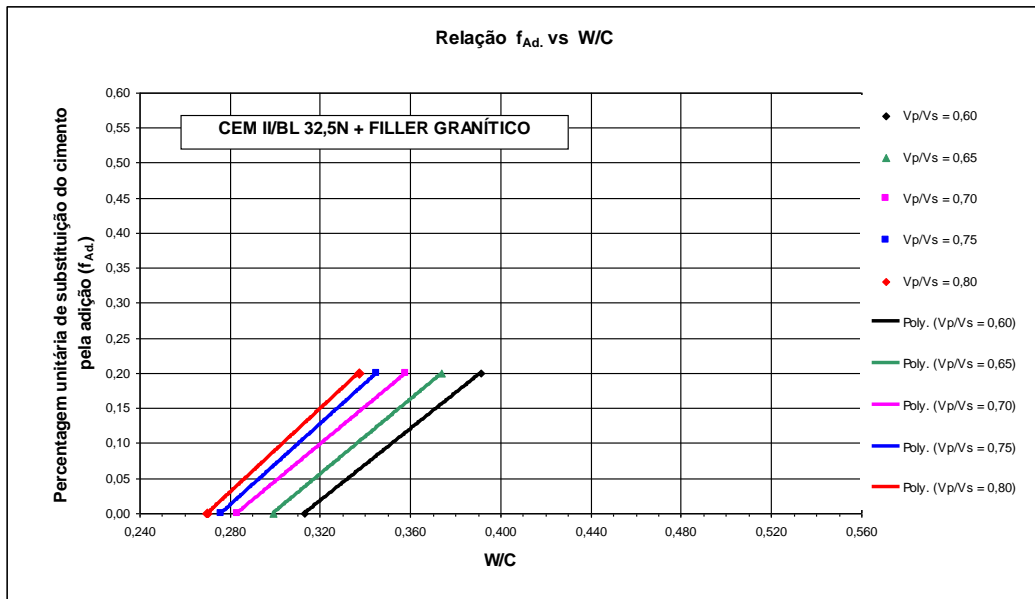


Figura 2.12 - Relação $f_{Ad.}$ vs W/C para as famílias com CEM II/B-L32,5N e fíler granítico

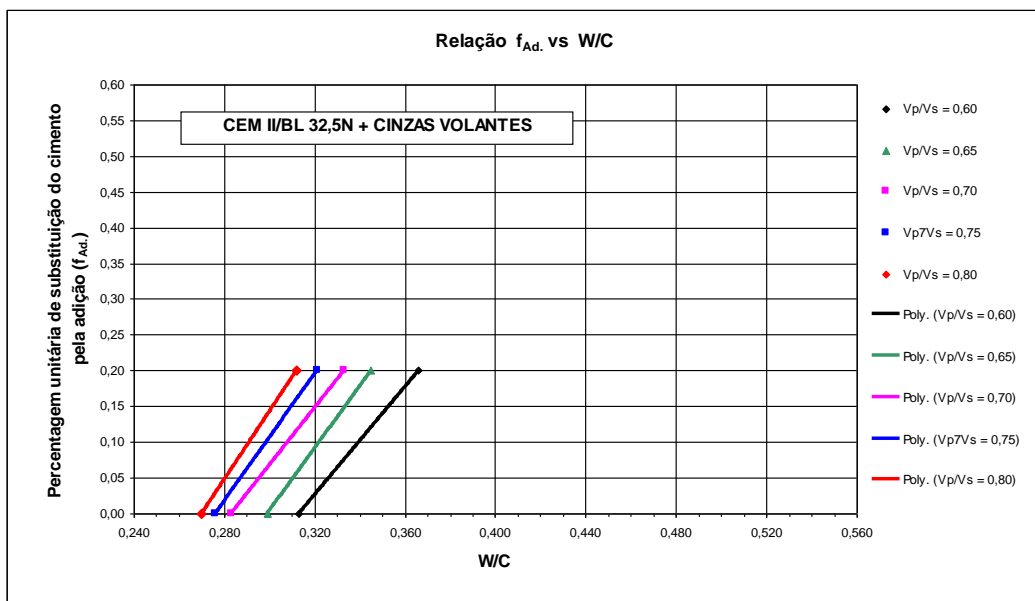


Figura 2.13 - Relação $f_{Ad.}$ vs W/C para famílias com CEM II/B-L32,5N e cinzas volantes

Em seguida procede-se à determinação experimental dos parâmetros (V_w/V_p) e ($S_p/p\%$) que conduzem aos parâmetros reológicos pretendidos, ou seja, a obtenção de G_m entre 5,3 e 5,9 e R_m entre 1,14 e 1,30 segundos como se pode verificar na Figura 2.14. Estes valores podem ser também estimados inicialmente através de correlações desenvolvidas por Nepomuceno [18] na sua tese (Figura 2.14 à Figura 2.18).

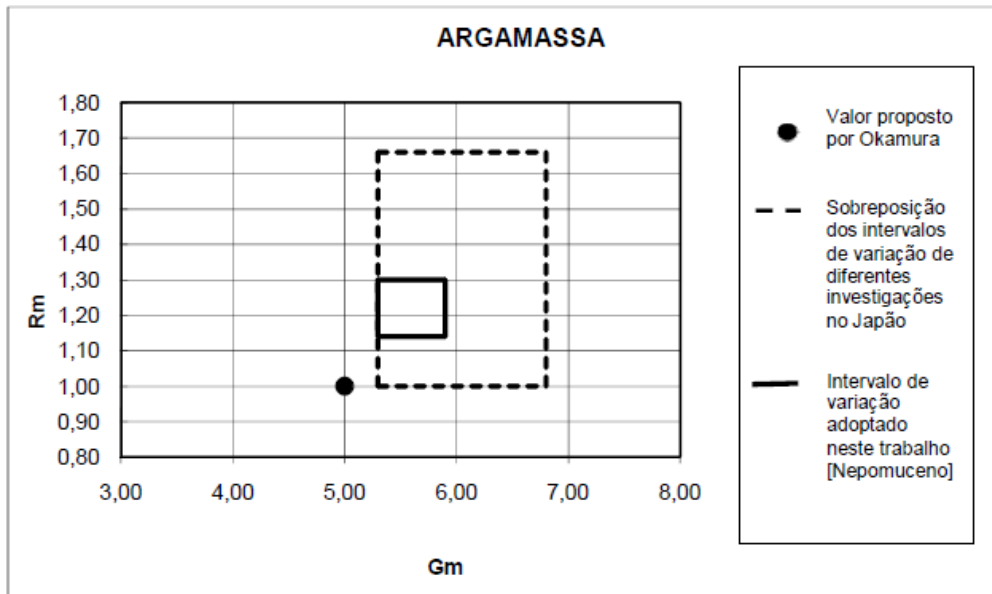


Figura 2.14 - Intervalo de variação dos parâmetros reológicos adoptados no método de Nepomuceno [18]

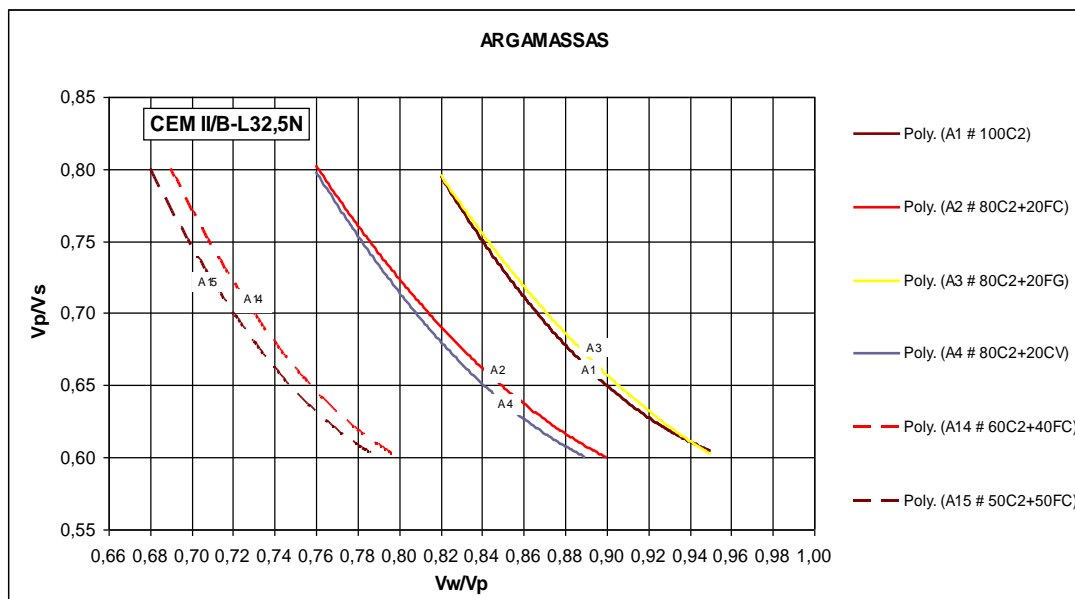


Figura 2.15 - Relação V_p/V_s versus V_w/V_p para as famílias com CEM II/B-L32,5N

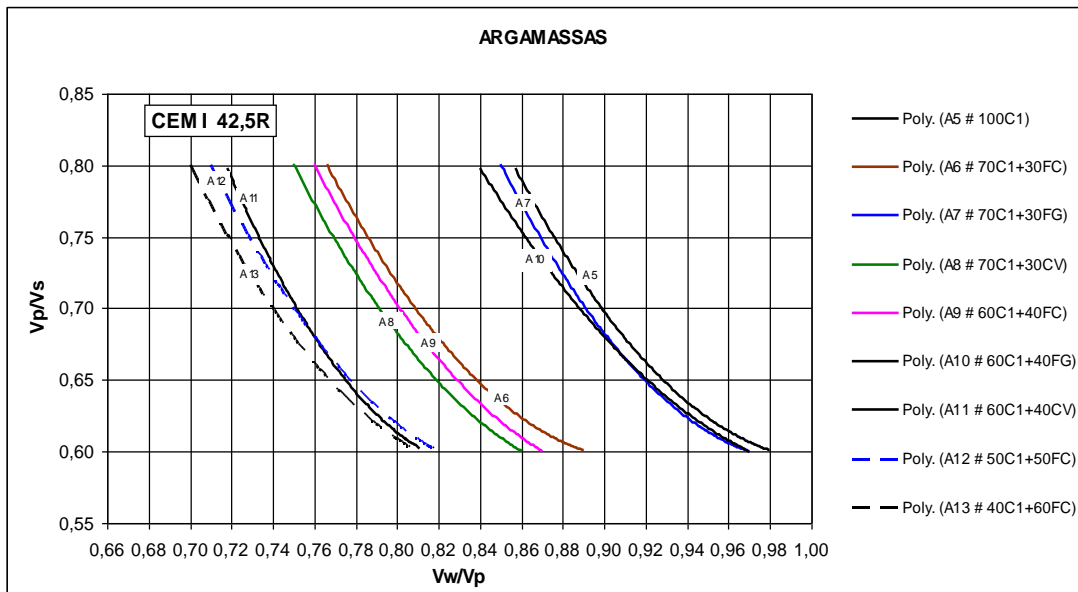


Figura 2.16 - Relação Vp/Vs versus Vw/Vp para as famílias com CEM I 42,5R

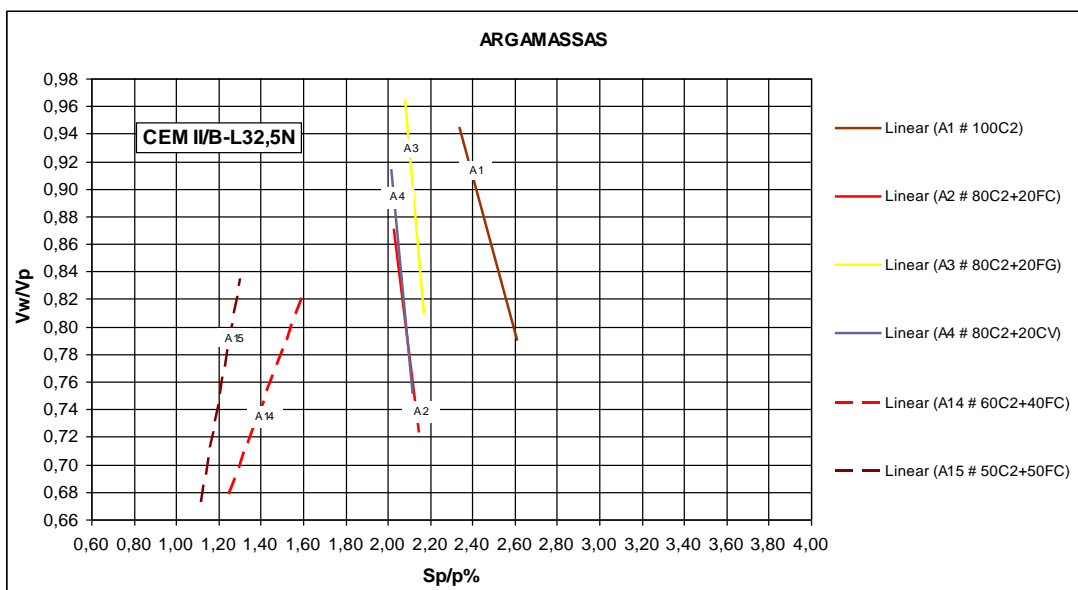


Figura 2.17 - Relação Vw/Vp versus $Sp/p\%$ para as famílias com CEM II/B-L32,5N

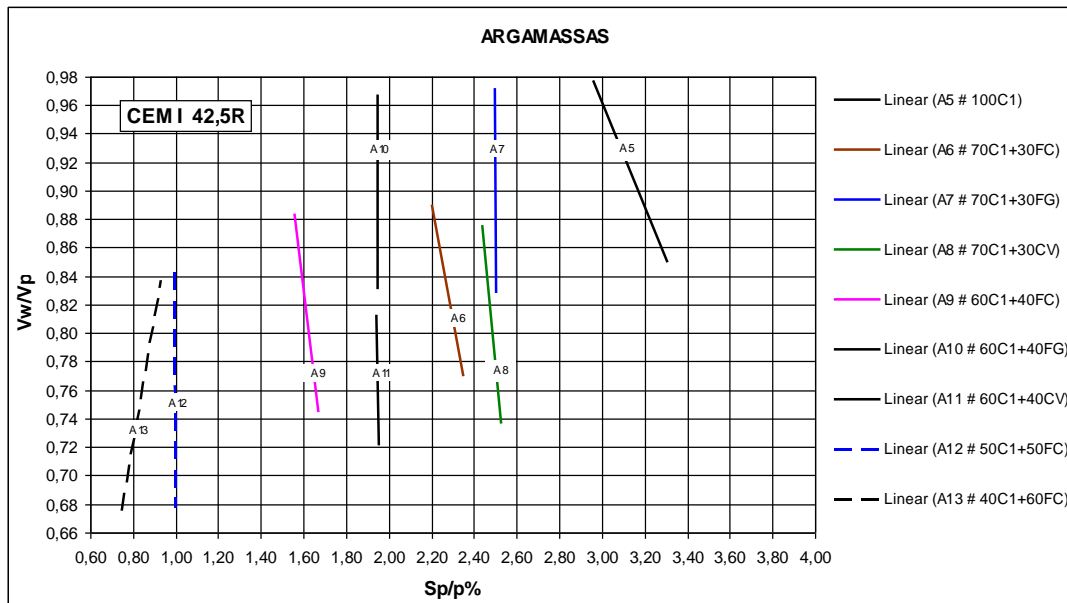


Figura 2.18 - Relação Vw/Vp versus Sp/p% para as famílias com CEM I 42,5R

Por fim, procede-se ao cálculo da composição da argamassa. Nepomuceno [18] apresenta neste método um cálculo exemplificativo da argamassa para uma situação de dois agregados finos e uma qualquer mistura de materiais finos.

No cálculo das argamassas são utilizados os seguintes parâmetros:

- 1) Percentagem unitária em volume absoluto dos agregados finos (V_s)

$$V_s = a_1 \times V_s + a_2 \times V_s \quad (2.5)$$

Em que:

- a_1 é a percentagem unitária em volume absoluto da areia 0/2,
- a_2 é a percentagem unitária em volume absoluto da areia 0/4.

- 2) Parâmetros que definem a família de finos (V_p)

$$V_p = fc1 \times V_p + fc2 \times V_p + fcv \times V_p + fms \times V_p + ffc \times V_p + ffg \times V_p \quad (2.6)$$

Em que:

- $fc1$ é percentagem unitária em volume absoluto do cimento tipo I 42,4R,
- $fc2$ é percentagem unitária em volume absoluto do cimento tipo II/B-L32,5N,
- fcv é percentagem unitária em volume absoluto das cinzas volantes,
- fms é percentagem unitária em volume absoluto da microssílica,

ffc é percentagem unitária em volume absoluto do filer calcário,
ffg é percentagem unitária em volume absoluto do filer granítico.

- 3) O parâmetro que define a relação em volume absoluto entre as quantidades de materiais finos e de agregados finos (V_p/V_s);
- 4) O parâmetro que define a relação em volume absoluto entre as quantidades de água e de materiais finos (V_w/V_p);
- 5) O parâmetro que representa a relação percentual em massa entre as dosagens de superplastificante e de materiais finos ($S_p/p\%$).

A fórmula fundamental do cálculo das argamassas para um volume de 1 m^3 tem a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} + V_v = 1,0 \quad (2.7)$$

Em que:

- V_p é o volume absoluto de materiais finos em m^3/m^3 ,
- V_w é o volume de água em m^3/m^3 ,
- V_s é o volume absoluto de agregados finos em m^3/m^3 ,
- V_{sp} é o volume de superplastificante em m^3/m^3 ,
- V_v é o volume de vazios em m^3/m^3 .

Assumindo que o volume de vazios é desprezável no cálculo das argamassas resulta:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} = 1,0 \quad (2.8)$$

Então:

$$V_p + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \times V_p + \frac{1}{\left(\frac{V_s}{V_p}\right)} \times V_p + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) \times V_p = 1,0 \quad (2.9)$$

Assim obtêm-se:

$$V_p = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) + \frac{1}{\left(\frac{V_s}{V_p}\right)} + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right)} \quad (2.10)$$

$$V_w = \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \times V_p \quad (2.11)$$

$$V_{sp} = \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) \times V_p \quad (2.12)$$

$$V_s = \frac{V_p}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} \quad (2.13)$$

De todos os parâmetros apresentados nas expressões anteriores apenas desconhecemos o (V_{sp}/V_p) , que pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$\left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) = \left(\frac{S_p}{P}\right) \times \frac{\delta_p}{\delta_{sp}} \quad (2.14)$$

Onde:

$$\delta_p = fc1 \times \delta_{c1} + fc2 \times \delta_{c2} + fcv \times \delta_{cv} + fms \times \delta_{ms} + ffc \times \delta_{fc} + ffg \times \delta_{fg} \quad (2.15)$$

e

$$\left(\frac{S_p}{P}\right) = \left(\frac{S_p}{P\%}\right) / 100 \quad (2.16)$$

Uma vez conhecido o valor de V_p , podem ser determinadas as dosagens dos materiais finos a partir das seguintes expressões:

$$V_{c1} = fc1 \times V_p \quad (2.17)$$

$$V_{c2} = fc2 \times V_p \quad (2.18)$$

$$V_{cv} = fcv \times V_p \quad (2.19)$$

$$V_{ms} = fms \times V_p \quad (2.20)$$

$$V_{fc} = ffc \times V_p \quad (2.21)$$

$$V_{fg} = ffg \times V_p \quad (2.22)$$

Em que:

V_{c1} é o volume absoluto de cimento tipo I 42,5R, em m^3/m^3 ,

V_{c2} é o volume absoluto de cimento tipo II/B-L32,5N, em m^3/m^3 ,

V_{cv} é o volume absoluto de cinzas volantes, em m^3/m^3 ,

V_{ms} é o volume absoluto de microssilica, em m^3/m^3 ,

V_{fc} é o volume absoluto de fíler calcário, em m^3/m^3 ,

V_{fg} é o volume absoluto de fíler granítico, em m^3/m^3 ,

Os restantes parâmetros assumem o significado já anteriormente referido.

Da mesma forma, conhecido o valor de V_s podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados finos a partir das seguintes expressões:

$$V_{S1} = a_1 \times V_s \quad (2.23)$$

$$V_{S2} = a_2 \times V_s \quad (2.24)$$

Em que:

V_{S1} é o volume absoluto do agregado fino 1 (Areia 01), em m^3/m^3 ,

V_{S2} é o volume absoluto do agregado fino 2 (Areia 05), em m^3/m^3 ,

a_1 é a percentagem unitária do agregado fino 1 (Areia 01),

a_2 é a percentagem unitária do agregado fino 2 (Areia 05).

A partir das respectivas massas volúmicas é possível converter as dosagens em volume absoluto para valores em massa, obtendo assim dosagens por metro cúbico de argamassa.

2.2.2.4- Estudos em betões

Para o estudo da composição de betões sem introdutores de ar define-se à partida um volume de vazios (V_v) de $0,030 m^3$ e uma razão (V_m/V_g) que é determinada de acordo com a auto-compactabilidade pretendida. O ensaio realizado na “Caixa-L” é o que melhor avalia o grau de auto-compactabilidade através do parâmetro (H_2/H_1) [18].

Nepomuceno [18] introduziu um parâmetro novo (MN) que se caracteriza por ser o produto do parâmetro (V_p/V_s) pelo parâmetro (V_m/V_g). Assim, definido o parâmetro (MN) e o parâmetro (V_p/V_s) da argamassa é possível estimar o parâmetro (V_m/V_g). A Figura 2.19 apresenta graficamente modelo desenvolvido, que relaciona o parâmetro (MN) com a razão (H_2/H_1) obtida pelo ensaio da “Caixa-L” e o diâmetro médio de espalhamento (D_m) obtido no ensaio de espalhamento. Esse modelo é traduzido analiticamente pela Equação 2.25, apresentando um coeficiente de correlação próximo de 0,90. Na Equação 2.25, as constantes a , b e c assumem os seguintes valores: $a= 2,188490958$; $b= -0,09966278$ e $c= -673,282885$.

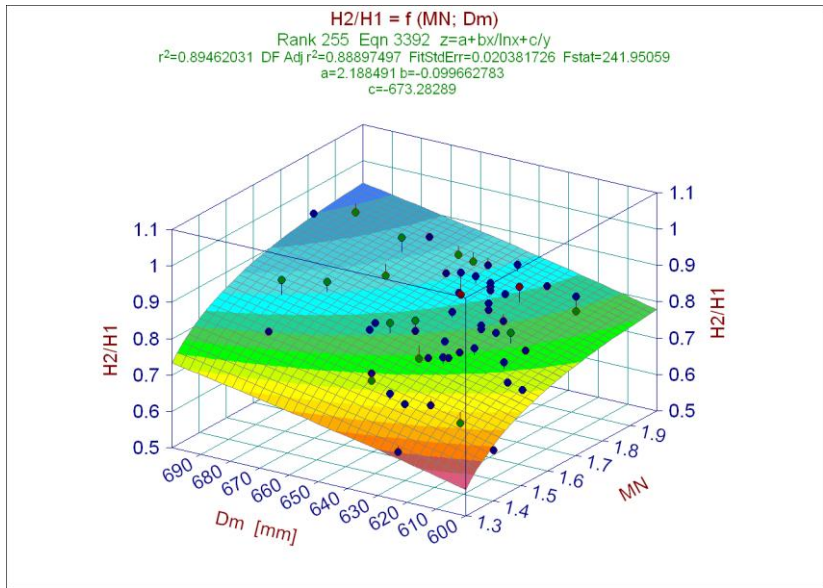


Figura 2.19 - Modelo matemático para a auto-compactabilidade - “Caixa-L” [18]

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right) = a + b \times \frac{MN}{\ln(MN)} + \frac{c}{D_m} \quad (2.25)$$

Nepomuceno [18] assume na fase de estudo da composição um diâmetro de espalhamento de 650 ± 20 mm. Desta forma, o modelo pode ser representado conforme se ilustra na Figura 2.20.

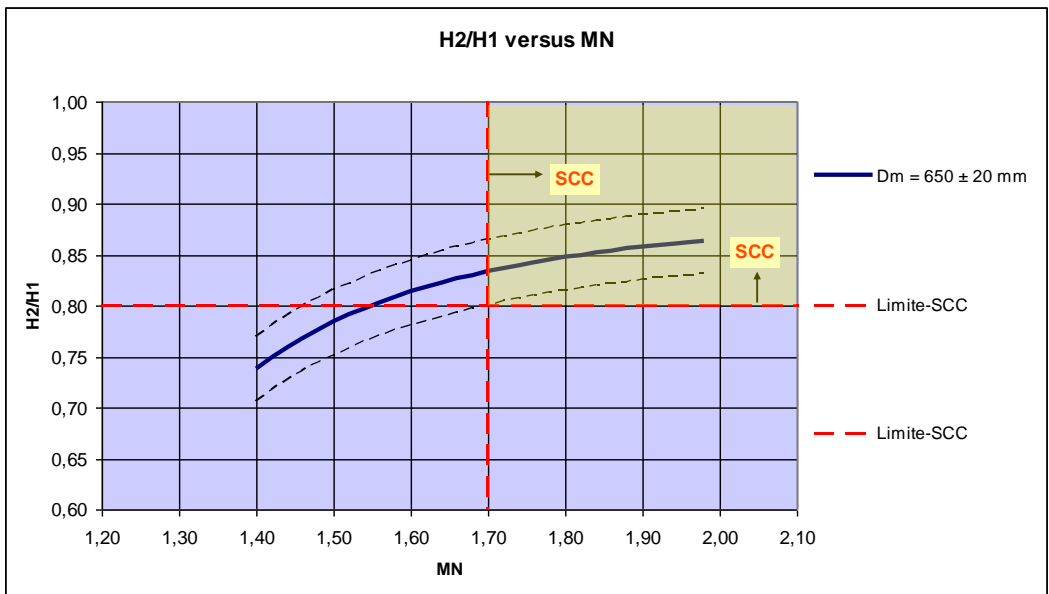


Figura 2.20 - Relação entre MN e H2/H1 quando Dm varia entre 630 e 670 mm [18]

Definidos todos os parâmetros, procede-se ao cálculo dos betões. Nepomuceno [18] apresenta um procedimento exemplificativo para uma situação em que se dispõe de dois agregados finos, três agregados grossos e uma qualquer mistura de finos.

No cálculo dos betões são utilizados os seguintes parâmetros:

- 1) Percentagem unitária em volume absoluto dos agregados finos (V_s)

$$V_s = a_1 \times V_s + a_2 \times V_s \quad (2.26)$$

- 2) Percentagem unitária em volume absoluto dos agregados grossos (V_g)

$$V_g = g_1 \times V_g + g_2 \times V_g + g_3 \times V_g \quad (2.27)$$

Em que:

- g_1 é a percentagem unitária em volume absoluto da brita 3/6;
- g_2 é a percentagem unitária em volume absoluto da brita 6/15;
- g_3 é a percentagem unitária em volume absoluto da brita 15/25.

- 3) Parâmetros que definem a família de finos (V_p)

$$V_p = fc1 \times V_p + fc2 \times V_p + f_{cv} \times V_p + fms \times V_p + ffc \times V_p + ffg \times V_p \quad (2.28)$$

- 4) O parâmetro que representa a relação em volume absoluto entre as quantidades de argamassa e de agregados grossos (V_m/V_g);

- 5) O parâmetro que define a relação em volume absoluto entre as quantidades de finos e de agregados finos (V_p/V_s);

- 6) O parâmetro que define a relação em volume absoluto entre as quantidades de água e de materiais finos (V_w/V_p);

- 7) O parâmetro que representa a relação percentual em massa entre as dosagens de superplastificante e de materiais finos ($S_p/p\%$).

A fórmula fundamental do cálculo dos betões para um volume de 1m^3 tem a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_g + V_{sp} + V_v = 1,0 \quad (2.29)$$

Em que:

- V_p é o volume absoluto de materiais finos em m^3/m^3 ;
- V_w é o volume de água em m^3/m^3 ;

V_s é o volume absoluto de agregados finos em m^3/m^3 ;
 V_g é o volume absoluto de agregados grossos em m^3/m^3 ;
 V_{sp} é o volume de superplastificante em m^3/m^3 ;
 V_v é o volume de vazios em m^3/m^3 .

Considerando:

$$V_m = 1 - V_g - V_v \quad (2.30)$$

Da fórmula fundamental resulta a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} = V_m \quad (2.31)$$

Ou seja:

$$V_p + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \times V_p + \frac{1}{\left(\frac{V_s}{V_p}\right)} \times V_p + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) \times V_p = V_m \quad (2.32)$$

Onde:

$$V_m = V_g \times \left(\frac{V_m}{V_g}\right) \quad (2.33)$$

Deste modo, obtêm-se as seguintes expressões para o cálculo dos betões:

$$V_g = \frac{1 - V_v}{1 + \left(\frac{V_m}{V_g}\right)} \quad (2.34)$$

$$V_m = V_g \times \left(\frac{V_m}{V_g}\right) \quad (2.35)$$

$$V_p = \frac{V_m}{1 + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) + \frac{1}{\left(\frac{V_s}{V_p}\right)} + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right)} \quad (2.36)$$

$$V_w = \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \times V_p \quad (2.37)$$

$$V_{sp} = \frac{V_{sp}}{V_p} \times V_p \quad (2.38)$$

$$V_s = \frac{V_p}{\left(\frac{V_s}{V_p}\right)} \quad (2.39)$$

Sabe-se ainda que:

$$\left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) = \left(\frac{Sp}{P}\right) \times \frac{\delta_P}{\delta_{SP}} \quad (2.40)$$

Onde:

$$\delta_p = fc1 \times \delta_{c1} + fc2 \times \delta_{c2} + fcv \times \delta_{cv} + fms \times \delta_{ms} + ffc \times \delta_{FC} + ffg \times \delta_{FG} \quad (2.41)$$

e

$$\left(\frac{sp}{p}\right) = \left(\frac{sp}{p\%}\right) / 100 \quad (2.42)$$

Uma vez que se conhece o valor de V_p , é possível determinar-se as dosagens dos materiais finos a partir das seguintes expressões:

$$V_{c1} = fc1 \times V_p \quad (2.43)$$

$$V_{c2} = fc2 \times V_p \quad (2.44)$$

$$V_{cv} = fcv \times V_p \quad (2.45)$$

$$V_{ms} = fms \times V_p \quad (2.46)$$

$$V_{FC} = ffc \times V_p \quad (2.47)$$

$$V_{FG} = ffg \times V_p \quad (2.48)$$

Em que:

V_{c1} é o volume absoluto de cimento tipo I 42,5R, em m^3/m^3 ,

V_{c2} é o volume absoluto de cimento tipo II/B-L32,5N, em m^3/m^3 ,

V_{cv} é o volume absoluto de cinzas volantes, em m^3/m^3 ,

V_{ms} é o volume absoluto de microssílica, em m^3/m^3 ,

V_{FC} é o volume absoluto de fíler calcário, em m^3/m^3 ,

V_{FG} é o volume absoluto de fíler granítico, em m^3/m^3 ,

Os restantes parâmetros assumem o significado já anteriormente referido.

Da mesma forma, conhecido o valor de V_s podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados finos a partir das seguintes expressões:

$$V_{s1} = a_1 \times V_s \quad (2.49)$$

$$V_{s2} = a_2 \times V_s \quad (2.50)$$

Em que:

V_{s1} é o volume do agregado fino 1 (Areia 0/2), em m^3/m^3 ,

V_{s2} é o volume do agregado fino 2 (Areia 0/4), em m^3/m^3 ,

a_1 é a percentagem unitária do agregado fino 1 (Areia 0/2) em volume absoluto no total de agregados finos,

a_2 é a percentagem unitária do agregado fino 2 (Areia 0/4) em volume absoluto no total de agregados finos.

Conhecido ainda o valor de V_g podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados grossos a partir das seguintes expressões:

$$V_{g1} = g_1 \times V_g \quad (2.51)$$

$$V_{g2} = g_2 \times V_g \quad (2.52)$$

$$V_{g3} = g_3 \times V_g \quad (2.53)$$

Onde:

V_{g1} é o volume do agregado grosso 1 (Brita 3/6), em m^3/m^3 ,

V_{g2} é o volume do agregado grosso 2 (Brita 6/15), em m^3/m^3 ,

V_{g3} é o volume do agregado grosso 3 (Brita 15/25), em m^3/m^3 ,

g_1 é a percentagem unitária do agregado grosso 1 (Brita 3/6) em volume absoluto no total de agregados grossos,

g_2 é a percentagem unitária do agregado grosso 2 (Brita 6/15) em volume absoluto no total de agregados grossos,

g_3 é a percentagem unitária do agregado grosso 3 (Brita 15/25) em volume absoluto no total de agregados grossos.

A partir das respectivas massas volúmicas é possível converter as dosagens em volume absoluto para valores em massa, obtendo-se assim dosagens por metro cúbico de betão.

2.3- Conclusões

O método proposto por Okamura *et al* [23] teve uma enorme contribuição para o desenvolvimento do betão auto-compactável, na medida que, foi o pioneiro e revelou-se um método simples, de fácil utilização e a sua base impulsionou o aparecimento de novos métodos. A limitação mais evidente que este método apresenta é a ausência de referência quanto ao nível de resistência à compressão pretendida para o betão, no entanto, a baixa razão W/C deste método proporciona resistências aceitáveis para a maioria dos casos.

O método proposto por Nepomuceno [18] veio contribuir em parte para colmatar a limitação do método anterior, pois introduziu novos parâmetros para que fosse possível um melhor controlo da resistência à compressão na fase de estudo da composição e, ao mesmo tempo, permitiu maior liberdade na optimização da fase agregado tendo em vista diferentes níveis de auto-compactabilidade. Tendo utilizado como referência o método de Okamura, Nepomuceno [18] também estudou separadamente a fase de argamassa e a fase betão. No estudo da fase

argamassa definiu um intervalo para as propriedades reológicas conducentes à obtenção de betões auto-compactáveis, ao contrário de Okamura que define apenas um par de valores de G_m e R_m . Na fase argamassa introduziu ainda o parâmetro V_p/V_s e a “família de finos” e estabeleceu correlações entre esses parâmetros e a razão W/C estabelecida de acordo com a resistência pretendida. Por fim, para a determinação dos parâmetros V_w/V_p e $Sp/p\%$ propôs uma metodologia experimental por aproximação sucessiva que conduz à obtenção dos parâmetros reológicos G_m e R_m pretendidos. No estudo dos betões, é definido um $V_v=0,03m^3$, enquanto que o parâmetro V_m/V_g é definido em função do grau de auto-compactabilidade pretendido para o betão, avaliado através do parâmetro H_2/H_1 na “Caixa-L”, do diâmetro de espalhamento no ensaio “Slump-flow” e do parâmetro MN introduzido por Nepomuceno, que é o produto dos parâmetros V_p/V_s e V_m/V_g .

Da análise efectuada, é possível perceber que as propriedades reológicas da fase argamassa são determinantes para o comportamento do betão auto-compactável e que é possível conhecer com algum rigor essas propriedades. Em consequência, as propriedades reológicas do betão auto-compactável, pelo menos em meio livre (sem obstáculos) podem ser inferidas a partir das propriedades reológicas da sua matriz, constituída pela argamassa. Isto significa que a avaliação da retenção da trabalhabilidade do betão auto-compactável pode ser efectuada pela avaliação da retenção das propriedades reológicas da fase argamassa.

Capítulo 3- A retenção da trabalhabilidade e a sua contextualização

3.1- Introdução

O fenómeno da retenção de trabalhabilidade dos betões tem sido considerado desde há muito tempo um factor prático importante para as empresas produtoras de betão. Essa preocupação tornou-se ainda mais relevante quando se trata de um betão auto-compactável, visto a auto-compactabilidade não poder ser compensada em obra por vibração adicional, como ocorria no betão corrente vibrado.

Após a amassadura do betão na central, segue-se o processo de transporte até à obra, ocorrendo finalmente a sua aplicação. O tempo decorrido e todos os factores ambientais envolvidos, provocam uma gradual perda de trabalhabilidade. Existem várias práticas para controlar a retenção de trabalhabilidade, entre elas destacam-se o uso de redutores de água de alta gama (superplastificantes), um ligeiro acréscimo de água durante ou após o transporte, produtos que retardam a hidratação, entre outros.

A trabalhabilidade pode ser considerada como um conceito relativo, pois é avaliada com recurso a inúmeros ensaios e parâmetros, facto este que a pode tornar aceitável ou não mediante certas condições [18]. Contudo, é sabido que a qualidade do produto final, está fortemente dependente das qualidades e propriedades apresentadas por este no seu estado fresco. Nos sub-capítulos seguintes, apresentam-se as propriedades do betão e da argamassa no estado fresco, assim como todo o processo que decorre deste a produção do betão até à sua aplicação.

3.2- Avaliação das propriedades no estado fresco

3.2.1-Argamassa

A argamassa apresenta como principais propriedades no seu estado fresco, a sua trabalhabilidade, retenção de água, aderência inicial e retracção na secagem.

A trabalhabilidade é uma propriedade de avaliação qualitativa, de um modo simples é possível considerar uma argamassa trabalhável quando esta se mantém fluida e coesa ao ser transportada, não endurece rapidamente ao ser aplicada, entre outros. A massa específica e o teor de ar são propriedades que influenciam directamente a trabalhabilidade, quanto menor a massa específica e maior o teor de ar melhor se apresenta a trabalhabilidade.

A presença de aditivos (por exemplo, superplastificantes), melhoram a trabalhabilidade até um determinado limite.

A retenção de água, representa a capacidade da argamassa reter a água de amassadura contra a sucção da base ou contra a evaporação. A retenção permite que as reacções de endurecimento da argamassa se tornem mais graduais, promovendo a adequada hidratação do cimento e conseqüente ganho de resistência.

A rápida perda de água compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações, a resistência mecânica e, com isso, a durabilidade. Da mesma forma que a trabalhabilidade, os factores influentes na retenção de água são as características dos materiais constituintes da argamassa. A presença de aditivos pode melhorar essa propriedade.

A retracção na secagem, ocorre em função da evaporação da água de amassadura e, também, pelas reacções de hidratação e carbonatação dos aglomerantes. A retracção pode acabar por causar a formação de fissuras no revestimento.

Os factores que influenciam essa propriedade são: as características dos materiais constituintes da argamassa, a espessura e o intervalo de aplicação das camadas.

As argamassas com um alto teor de cimento, denominadas “fortes”, são mais sujeitas às tensões que causarão o aparecimento de fissuras prejudiciais durante a secagem. Já as argamassas mais “fracas”, são menos sujeitas ao aparecimento das fissuras prejudiciais.

3.2.2- Betão

A propriedade mais importante do betão auto-compactável no estado fresco é precisamente a sua capacidade de auto-compactabilidade. Em termos mecânicos esta propriedade está relacionada com a reologia do betão fresco, enquanto que, em termos de manuseamento na prática está relacionada com os parâmetros de trabalhabilidade [16].

3.2.2.1- Reologia

A reologia pretendida para o betão auto-compactável é fundamentalmente a conjugação de duas propriedades, o baixo valor da tensão de corte (baixa resistência inicial ao movimento), juntamente com uma adequada viscosidade plástica [16]. O comportamento do betão auto-compactável pode ser descrito com base na reologia das suspensões de partículas.

Os principais mecanismos que influenciam os parâmetros reológicos são o atrito inter-partículas e a quantidade de água livre que depende da tensão na superfície e da dispersão das partículas. A dispersão das partículas e a tensão superficial podem ser modificadas pelo uso de superplastificantes adequados e por uma compacidade adequada das partículas finas. Os agentes de viscosidade actuam essencialmente na viscosidade plástica [16].

A avaliação do comportamento reológico compreende duas medições envolvendo relações entre a tensão de corte e a taxa de deformação e os parâmetros resultantes: tensão de cedência e viscosidade plástica [16].

É necessário que exista pasta suficiente que envolva os agregados e tenha elevada viscosidade. Para evitar a segregação da mistura, esta deve ter o mínimo de água possível em relação à quantidade de material fino existente. Tal efeito, obtém-se através do uso de superplastificante que, por um lado, confere a viscosidade necessária à mistura, e, por outro lado, reduz ao máximo a quantidade de água dessa mistura [3].

3.2.2.2- Trabalhabilidade

O conceito de trabalhabilidade do betão auto-compactável pode ser traduzido pela capacidade que este possui, depois de colocado, em se mover pela acção do seu peso próprio e preencher todos os espaços no interior da cofragem, originando um betão de qualidade uniforme e sem defeitos. Uma adequada trabalhabilidade proporciona um betão auto-compactável de elevada qualidade e durabilidade [30]. Para tal, o betão deve reunir as seguintes propriedades no estado fresco:

- Capacidade de enchimento;
- Resistência à segregação;
- Capacidade de passagem.

A capacidade de enchimento depende da capacidade de deformação e da velocidade de deformação, ou seja, da distância que o betão consegue percorrer desde a sua descarga e da velocidade com que o betão se deforma. Em suma, para se obter uma boa capacidade de enchimento é necessário encontrar-se o equilíbrio entre estes dois parâmetros. Para tal, deve-se aumentar a deformabilidade da pasta através do uso de superplastificantes e efectuar um controle rigoroso da razão água/(materiais finos). Por outro lado, deve-se reduzir o atrito entre as partículas através da redução do volume de agregados grossos, melhorando assim a granulometria da fase sólida [30].

A resistência à segregação é caracterizada pela heterogeneidade na distribuição dos materiais constituintes. Existem vários tipos de segregação, mas talvez a segregação dos materiais

grossos seja aquela que mais condiciona a auto-compactação do betão quando surgem grandes volumes densamente armados [30].

Para alcançar uma boa resistência a segregação deve ter-se em consideração alguns dos seguintes aspectos [30]:

- Reduzir a máxima dimensão dos agregados;
- Baixar a razão água/finos;
- Recorrer a agentes de viscosidade.

A capacidade de passagem é caracterizada pela capacidade de fluidez e pela resistência à segregação que o betão deve apresentar de forma a cumprir de forma eficaz a sua função. Na produção do betão é necessário levar em conta a escolha adequada dos materiais, para que o tamanho e a proporção de agregados grossos seja compatível com o espaçamento da armadura e a abertura da cofragem dos elementos a betonar [30]. Os obstáculos vão provocar alterações no normal percurso das partículas de agregado, provocando um aumento de contacto entre as partículas, formando uma espécie de arco que bloqueia a restante mistura de betão, como ilustra a Figura 3.1 [30].

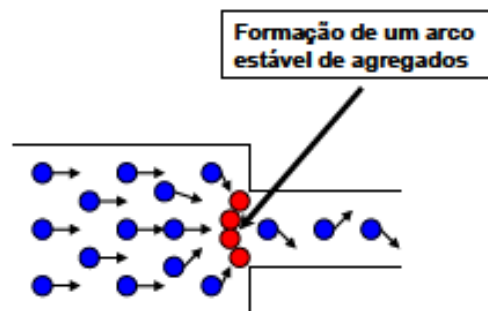


Figura 3.1 - Mecanismo de bloqueio [30]

Normalmente, o bloqueio ocorre se a dimensão máxima do agregado é demasiado grande ou se o conteúdo de agregado grosso da mistura for elevado. Para se melhorar a coesão de forma a diminuir o risco de segregação dos agregados, deve reduzir-se a razão água/finos, baixar o conteúdo de agregados grossos e recorrer ao uso de agentes de viscosidade [30].

3.3- Produção, transporte e colocação em obra

3.3.1-Controlo da produção do betão

O betão auto-compactável requer um controlo rigoroso no que respeita à sua produção, pois, como mencionado anteriormente, este betão é mais sensível que o betão corrente vibrado.

Esta sensibilidade, reflecte-se principalmente no que respeita a variações do teor de humidade, temperatura, granulometria e forma dos agregados. É recomendado que se ensaie os agregados antes de os utilizar na produção de betão auto-compactável e que se ajuste as proporções da mistura em função das variações que os agregados demonstrem. Tal como no betão corrente, a produção de betão auto-compactável esta sujeita a um normal controlo, satisfazendo os requisitos da norma NP EN 206-1 [13].

Nesta dissertação não foram aprofundadas as questões relativas aos equipamentos de mistura mais adequados para a produção de cada betão pretendido, mas é de notar que o tipo de betoneira usada também pode influenciar a razão volumétrica água/(materiais finos), a quantidade de superplastificante, entre outros.

Muitos dos parâmetros que influenciam o desempenho do betão auto-compactável podem ser avaliados por ensaios em argamassas. Domone *et al.* [5], por exemplo, no seu estudo, recorreram a argamassas adequadas à produção de betões auto-compactáveis e avaliaram o efeito do tempo de entrada do superplastificante durante o processo de mistura e as características de retenção da trabalhabilidade das misturas. Utilizaram, para tal, quatro tipos diferentes de superplastificantes, sendo que dois deles eram de nova geração. Para avaliar as propriedades das argamassas recorreram ao ensaio de espalhamento e ao ensaio de fluidez (Funil-V).

Partindo das misturas óptimas obtidas, Domone *et al.* [5] produziram novas amassaduras fazendo variar apenas o instante da adição do superplastificante, desde a adição directa no início da mistura até uma entrada retardada de 6 minutos. Estes autores observaram que existe uma “janela” para o tempo de entrada do superplastificante para o qual a máxima eficácia é obtida e esse tempo óptimo depende da composição do cimento, da temperatura e do procedimento de mistura [5]. Isto sugere então que a “janela” do tempo de entrada do superplastificante deve ser definida no estudo da composição do betão e deve ter-se em conta a capacidade deste procedimento ser reproduzido em central. Em consequência, será de concluir que a simples alteração dos procedimentos de amassadura é susceptível de afectar as propriedades reológicas da argamassa e, em consequência, poderá afectar a trabalhabilidade do betão auto-compactável [18].

3.3.2- Transporte do betão

O transporte do betão auto-compactável desde a central até à obra é realizado normalmente através de camiões auto-betoneira, mantendo uma velocidade lenta de rotação do tambor para garantir a homogeneidade da mistura e prevenir a ocorrência de fenómenos de segregação. A qualidade do betão auto-compactável, ou seja, a manutenção das suas propriedades no estado fresco, depende do tempo decorrido após a mistura. Numa previsão

ideal, o transporte deve efectuar-se num tempo máximo de 60 minutos, o que nem sempre é possível, porém, utilizando a nova geração de superplastificantes é possível “esticar” este tempo até um máximo de 120 minutos [30].

As condições de transporte, principalmente a temperatura ambiente pode afectar as propriedades do betão, na medida em que afecta a velocidade com que se formam os produtos da hidratação do cimento e afecta o tempo de retenção da trabalhabilidade [31].

A trabalhabilidade do betão auto-compactável varia com o tempo decorrido após a amassadura, e este é consensualmente considerado o parâmetro mais importante a ter em conta quando se planeia o transporte do betão [31].

3.3.3- Recepção do betão em obra

No conceito de auto-compactação está considerada a capacidade de enchimento, resistência à segregação e a capacidade de passagem, que dependem das condições de fronteira dos elementos a betonar, como a forma, dimensão e a densidade de armaduras dos elementos estruturais onde o betão vai ser colocado. Assim, a qualidade do betão fresco deve ser caracterizada considerando também as condições de fronteira [30].

Nos ensaios de recepção do betão auto-compactável, como critérios de aceitação das propriedades em estado fresco, devem ser respeitados determinados intervalos limite para os ensaios realizados. Por exemplo, no Japão para avaliar as propriedades em estado fresco são geralmente usados em laboratório o ensaio de espalhamento, o ensaio de fluidez (com o Funil-V) e o ensaio da Caixa-U. Porém, em obra é usado apenas o ensaio de espalhamento, devido à sua capacidade de avaliar em simultâneo a capacidade e a velocidade de deformação do betão. O valor de referência para o controle do diâmetro de espalhamento e do tempo T500 depende do tipo de materiais usados na composição do betão e das condições de fronteira dos elementos a betonar, mas geralmente é considerado para o diâmetro de espalhamento valores compreendidos entre os 550 e os 650 mm e para o tempo T500 valores de 2 a 5 segundos [30].

A compacidade do betão auto-compactável e como consequência o seu comportamento mecânico e de durabilidade, dependem do nível de auto-compactação do betão. Se o nível de auto-compactabilidade for muito baixo, este não pode ser compensado por trabalhos adicionais na obra [18].

3.3.4-Colocação do betão

Na colocação de um betão auto-compactável deve limitar-se a distância de colocação horizontal para evitar a ocorrência de segregação do agregado grosso. Esta distância depende das condições de fronteira dos elementos a betonar, isto é, da forma, dimensão, densidade e pormenorização das armaduras [30].

O betão auto-compactável tem a capacidade de se auto-nivelar. No entanto, este não tem a capacidade de escoar e nivelar como um fluido real. O gradiente de escoamento do betão auto-compactável está situado entre 1/10 a 1/100. Este valor pode variar dependendo da composição da mistura e das condições de fronteira [30].

Geralmente, o betão auto-compactável pode ser descarregado de uma altura superior ao betão corrente. Em aplicações efectuadas no passado, verificou-se que para não ocorrer segregação, a distância recomendável entre a boca da mangueira de bombagem e a superfície de colocação do betão, deve estar compreendida entre 0 a 5 m [30].

A partir da experiência Japonesa, consta-se que a taxa de colocação do betão auto-compactável tende a ser mais lenta que a do betão corrente. Geralmente a taxa de colocação está situada entre os 10 e os 20 m³/h [30].

O início da cura no betão auto-compactável deve ser realizado mais cedo que no betão corrente, devido a este apresentar menor razão água/(materiais finos) e menor exsudação, originando uma secagem superficial mais rápida que tem como consequência a retracção plástica (originando fissurações superficiais) [13].

3.4- Conclusões

A manutenção ou retenção da trabalhabilidade do betão auto-compactável durante todo o processo que decorre desde a sua produção até à sua colocação em obra é absolutamente determinante para a maior ou menor compacidade do produto final, uma vez que este betão é aplicado sem qualquer vibração ou outra forma de compactação. Uma insuficiente auto-compactabilidade aquando da colocação do betão em obra não poderá ser compensada por trabalho adicional através de compactação mecânica uma vez que isso poderia comprometer seriamente a sua homogeneidade, com consequências para as suas propriedades no estado endurecido.

Em comparação com o betão corrente vibrado, a trabalhabilidade do betão auto-compactável é mais sensível à variação dos materiais, variações na dosagem de água, temperatura ambiente, condições e duração do transporte, condições de colocação, etc. Por esse motivo,

o estudo da composição de um betão auto-compactável deverá ter em conta as diferentes fases que envolvem a produção e manuseamento do material.

No processo de produção devem ser definidos com rigor os procedimentos de controlo da dosagem efectiva de água na mistura através de medições do teor em água superficial dos agregados e a própria distribuição granulométrica dos agregados finos deverá ser também inspeccionada com regularidade. Outros factores importantes incluem a selecção do tipo de betoneira, definição da ordem de entrada dos materiais e a sequência e duração da amassadura.

No processo de transporte deverá observar-se qualquer possível efeito de segregação dos agregados, mas especialmente relevante será a avaliação da retenção da trabalhabilidade durante o tempo em que decorre esse transporte.

A colocação é feita normalmente por bombagem. Existe no entanto indicações de que a pressão de bombagem poderá afectar a trabalhabilidade do betão se este não possuir adequada resistência à segregação. Acima de determinados valores, que dependem da taxa de armaduras e da forma das cofragens, a altura de queda, a distância de colocação horizontal e a taxa de betonagem poderão também afectar a trabalhabilidade do betão fresco.

Capítulo 4- Descrição do programa experimental

4.1- Introdução

O presente trabalho teve como principal objectivo estudar e avaliar o comportamento dos vários parâmetros que influenciam a retenção da trabalhabilidade em betões auto-compactáveis. Para tal, como referido anteriormente, apenas se deu ênfase à fase de argamassas, de modo a facilitar o trabalho laboratorial. Foram realizados sucessivos ensaios divididos em três séries com o intuito de avaliar convenientemente os vários parâmetros considerados como fundamentais.

Após uma pesquisa prévia em literatura científica e considerando-se as limitações do estudo a desenvolver, seleccionaram-se alguns parâmetros relevantes para a análise do fenómeno da retenção da trabalhabilidade do betão auto-compactável. Assim, definiu-se que os parâmetros fundamentais a ter em conta no estudo seriam:

- Série a) Influência do tipo de cimento;
- Série b) Influência da temperatura;
- Série c) Influência da dosagem de superplastificante (Sp/p%).

Para dar início aos estudos laboratoriais foi necessário definir, produzir e caracterizar uma argamassa base de referência, de modo a que, a partir desta, fosse possível efectuar uma análise comparativa dos vários parâmetros propostos e definir novos “caminhos”, com o objectivo de se tentar avaliar correctamente todos os parâmetros intervenientes.

Foram realizadas argamassas com recurso a adições binárias e ternárias. No entanto, é de referir que todas as argamassas produzidas neste estudo apresentam reologia semelhante, ou seja, respeitam os intervalos de Gm e Rm propostos no método de Nepomuceno [18].

Nos sub-capítulos seguintes descreve-se em pormenor todos os materiais usados nas misturas, bem como a estratégia que se adoptou para a realização dos ensaios.

4.2- Caracterização dos materiais utilizados

4.2.1-Ligantes

Utilizaram-se dois tipos distintos de ligantes para a realização das argamassas, o cimento portland CEM I 42,5R e o cimento portland de calcário CEM II/B-L32,5N. As suas massas específicas foram determinadas previamente de acordo com a especificação do LNEC E 64-1960 [12]. Os resultados da análise química, dos ensaios mecânicos e dos ensaios físicos efectuados para estes ligantes no processo de auto-controlo utilizado pelo fabricante foram cedidos aquando do fornecimento dos materiais.

4.2.2-Adições

Recorreu-se a dois tipos de adições, sendo uma delas do tipo I e a outra do tipo II. A adição do tipo I seleccionada foi o fíler de calcário, com a designação comercial de “*Betoncard P1-OU*” (Figura 4.1), que se encontrava disponível no laboratório e foi fornecida pela Companhia Mineira de Talcos de Portugal (OMYA-COMITAL). A outra adição seleccionada foi a microssilica, com a designação comercial de “*Sikacrete HD*”, também existente em laboratório (Figura 4.2) e adquirida à empresa SIKA-Portugal. As massas específicas das duas adições foram determinadas previamente de acordo com a especificação do LNEC E 64-1960 [12]. Foi ainda possível aceder aos resultados já disponíveis da determinação da superfície específica e dos volumes diferencial e cumulativo das adições em função do tamanho das partículas, recorrendo ao analisador de partículas por laser (COULTER LS 200) existente no Laboratório de Materiais do Departamento de Electromecânica da UBI.



Figura 4.1 - Amostra de fíler de calcário



Figura 4.2 - Amostra de microssilica

4.2.3-Agregados finos

Seleccionaram-se duas areias naturais de granulometria distinta para a realização das argamassas, sendo uma delas de grão fino proveniente da Figueira da Foz (Areia 0/2) e outra de grão intermédio proveniente de Abrantes (Areia 0/4). Estes materiais foram cedidos pela central de produção de betão (Betão Liz), sediada na zona industrial do Canhoso, no concelho da Covilhã. As areias foram transportadas a partir da central e armazenadas em barricas catalogadas e colocadas no interior do laboratório para se manter um melhor controlo do teor em água superficial.

Foram realizados préviamente vários ensaios às areias de modo a determinar todas as suas características necessárias ao estudo, nomeadamente:

- Determinação da massa volúmica dos agregados saturados de água e com a superfície seca, de acordo com as normas portuguesas NP 954 [21] e NP 581 [20];
- Determinação da absorção de água, em conformidade com a norma Portuguesa NP-581 [20] e especificação do LNEC E248-1971 [8];
- Análise granulométrica, efectuada de acordo com os procedimentos descritos na especificação do LNEC E245-1971 [7].

Previamente à realização de cada amassadura foi ainda determinado o teor em água superficial de cada uma das areias utilizadas, de acordo com os procedimentos descritos na especificação do LNEC E249-1971.

4.2.4-Adjuvantes

O adjuvante escolhido para a realização deste trabalho experimental foi fornecido pela empresa Sika-Portugal e tem a designação comercial de “*Sika ViscoCrete 3005*”. É um redutor de água de alta gama com uma base química constituída por carboxilatos modificados e está em conformidade com a especificação do LNEC E374 [11]. A massa específica do adjuvante foi fornecida pelo fabricante.

4.2.5-Água de amassadura

Seguindo a recomendação que consta na especificação do LNEC E372 [10], utilizou-se água potável da rede pública de abastecimento.

4.3- Proporções das misturas

4.3.1- Argamassa de referência

Definiu-se que a argamassa de referência deveria conter uma mistura binária de materiais finos, constituída por cimento portland (CEM I 42,5R) e fíler de calcário. Esta mistura deveria conduzir à obtenção de betões auto-compactáveis com uma resistência média à compressão de 55 ± 3 MPa, que se considerou ser um nível de resistência aceitável para a sua utilização corrente em muitas estruturas.

A definição dos parâmetros “chave” necessários ao cálculo da argamassa de referência, foi realizada da seguinte forma: o parâmetro V_p/V_s foi definido previamente (0,8) e manteve-se constante ao longo dos ensaios, enquanto os parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$ foram determinados experimentalmente de modo a ser possível obter a reologia pretendida para a argamassa. As percentagens unitárias de cada uma das areias em relação ao volume absoluto total de agregado fino (V_s) foram determinadas como sendo aquelas que conduziram a uma curva granulométrica o mais próximo possível da curva de referência estabelecida no método de Nepomuceno [18]. As percentagens unitárias de cimento portland e de fíler calcário em relação ao volume absoluto de materiais finos (V_p), que se definiu como “família de finos”, foram determinadas tendo em conta o nível de resistência à compressão pretendido para o betão que esta viesse a incorporar.

Família de finos da argamassa de referência

Para se obter a percentagem de substituição do cimento pela adição, recorreu-se à correlação já apresentada na Figura 2.5 do Capítulo 2, que se reproduz na Figura 4.3, que relaciona o valor médio da tensão de rotura à compressão do betão aos 28 dias com a razão água/cimento em massa (W/C). Obteve-se, em consequência, um valor para a razão W/C em massa de aproximadamente 0,57.

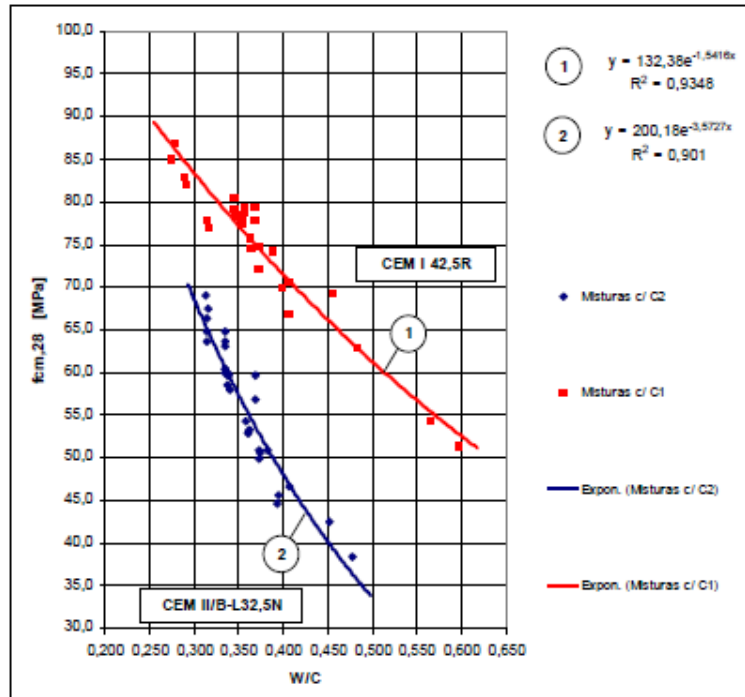


Figura 4.3 - Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão W/C

Uma vez que o parâmetro V_p/V_s foi previamente definido, foi então possível estimar a percentagem de substituição do cimento pela adição que conduziria à razão W/C pretendida, por consulta da correlação apresentada na Figura 4.4. Como é possível observar na referida figura, não existe uma correspondência directa para o valor anteriormente definido de W/C (0,57), porém, considerou-se que a curva se encontra na fase em que é já uma constante e, assim sendo, o valor da percentagem unitária de substituição do cimento pela adição foi de 0,60. Em consequência, a família de finos ficou definida pela associação binária de uma percentagem de 40% de cimento portland e 60% de fíler calcário.

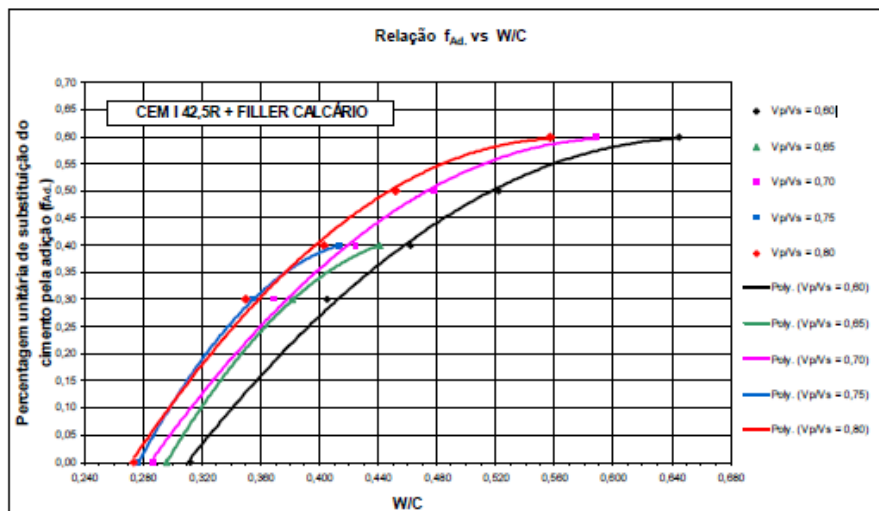


Figura 4.4 - Relação f_{Ad} vs W/C para famílias com CEM I 42,5R e fíler de calcário

Depois de obter todos estes parâmetros, como referido anteriormente, foi necessário determinar experimentalmente os parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$.

Uma vez definidos todos os parâmetros chave que proporcionaram um correcto acerto da argamassa, recorreu-se à folha de cálculo de Excel criada por Nepomuceno [18], para calcular correctamente as quantidades dos constituintes da argamassa.

No Quadro 4.1 apresenta-se um resumo dos parâmetros chave utilizados na produção da argamassa de referência.

Quadro 4.1- Identificação e resumo dos parâmetros da composição da mistura

Identificação da argamassa	Identificação da mistura de finos	Parâmetros da composição		
		V_p/V_s	V_w/V_p	$S_p/p\%$
A.MS.55.I.FC.0,80.8-25L	40C1+60FC	0,80	0,70	0,34

4.3.1.1- Influência das dosagens de água e superplastificante nas propriedades reológicas da argamassa de referência

Tendo por base os parâmetros obtidos anteriormente para a argamassa de referência, procedeu-se à avaliação da influência das dosagens de água e de superplastificante nas propriedades reológicas através dos parâmetros G_m e R_m .

Como representado no Quadro 4.2, a primeira abordagem foi no sentido de manter constante o parâmetro $S_p/p\%$, fazendo variar a quantidade de água (V_w/V_p).

Quadro 4.2 - Resumo da variação de dosagens V_w/V_p

	V_w/V_p	$S_p/p\%$
R	0,70	0,34
1	0,71	
2	0,74	
3	0,69	
4	0,66	

Seguidamente inverteu-se o processo, fixou-se o valor de V_w/V_p obtido para a argamassa de referência e variaram-se as quantidades de superplastificante ($S_p/p\%$), como se resume no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Resumo da variação de dosagens Sp/p%

	Sp/p%	Vw/Vp
R	0,34	0,7
5	0,35	
6	0,33	
7	0,30	
8	0,28	
9	0,37	

Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos no capítulo seguinte.

4.3.2-Influência do tipo de cimento (*Série a*)

Depois de realizada a análise à argamassa de referência, de modo a avaliar de forma eficaz o seu comportamento face à retenção da trabalhabilidade, foi necessário traçar novos “caminhos” para prosseguir a investigação.

O passo seguinte foi pensado como forma de avaliar a possível influência do tipo de cimento na composição da argamassa. Para se analisar a influência do tipo de cimento optou-se por substituir na mesma mistura de referência o cimento portland (CEM I 42,5R) por cimento portland de calcário (CEM II/B-L32,5N). Para tal, e de forma a que a análise e correlação futura dos dados fossem equivalentes, decidiu-se conceber uma argamassa cuja percentagem de adição se mantivesse constante, ou seja, igual à utilizada na argamassa de referência, permitindo manter a dosagem de cimento, alterando apenas o tipo. Porém, embora esta premissa seja possível, vai implicar que a resistência definida inicialmente de 55 MPa não seja possível de cumprir para esta mistura.

Como é possível observar na Figura 4.3 não existe desta vez uma correspondência directa para o valor definido de W/C (0,57) na curva do cimento portland de calcário (CEM II/B-L32,5N), porém analisando o mesmo gráfico é possível prever que a resistência seja aproximadamente de 32 MPa.

Tal como na argamassa de referência foi necessário também neste caso determinar experimentalmente os parâmetros Vw/Vp e Sp/p%. O Quadro 4.4 apresenta os parâmetros chave para a argamassa da *Série a*.

Quadro 4.4 - Identificação e resumo dos parâmetros da composição da mistura (*Série a*)

Identificação da argamassa	Identificação da mistura de finos	Parâmetros da composição		
		Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%
A.MS.55.II.FC.0,80.7 - 25L	40C2+60FC	0,80	0,69	0,455

4.3.3-Influência da temperatura (*Série b*)

Mais uma vez, tomando como “ponto de partida” a argamassa de referência, realizada à temperatura de 16 °C (temperatura ambiente verificada no laboratório e registada através de um termohigrómetro), propôs-se como termo de comparação, a realização de duas argamassas cujas suas temperaturas de amassadura fossem num dos casos superior e em outro inferior à argamassa de referência.

Utilizando rigorosamente todos os parâmetros chave, percentagem de substituição do cimento e resistência pretendida igual ao da argamassa de referência, iniciou-se o processo de elaboração de duas argamassas em tudo semelhantes, diferenciadas apenas pela temperatura dos seus materiais constituintes.

Argamassa de referência à temperatura de 10 °C

No dia anterior à amassadura, aproveitando o clima frio que se fazia sentir na região (Covilhã), colocaram-se os materiais finos armazenados em barricas no exterior do laboratório, de modo a baixar consideravelmente as suas temperaturas.

Seguiu-se com rigor o plano de amassadura que havia sido utilizado na argamassa de referência. No fim da amassadura, procedeu-se à medição da temperatura com o auxílio de um termómetro (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Medição da temperatura de amassadura

Argamassa de referência à temperatura de 22 °C

De modo a preparar convenientemente os materiais para a amassadura, colocaram-se as quantidades necessárias de agregados finos em tabuleiros metálicos no interior de uma estufa (Figura 4.6), o tempo suficiente para atingirem uma temperatura ligeiramente acima dos

22 °C, mas sem sofrerem secagem excessiva que conduzisse à perda de água absorvida. A água de amassadura foi utilizada a uma temperatura acima dos 22 °C, tendo sido retirada directamente de um cilindro eléctrico para AQS. O cimento portland (CEM I 42,5R), o fíler de calcário e o superplastificante foram introduzidos na amassadura à temperatura ambiente, sensivelmente de 16 °C.



Figura 4.6 - Estufa utilizada para aquecer os materiais

Após a amassadura mediu-se a temperatura da argamassa de forma semelhante à anterior e verificou-se que esta se aproximava dos 22 °C. Realizaram-se de seguida os habituais ensaios reológicos de modo a avaliar as propriedades da argamassa.

O quadro que a seguir se apresenta (Quadro 4.5) resume os parâmetros chave utilizados na produção das argamassas da *Série b*.

Quadro 4.5 - Identificação e resumo dos parâmetros da composição da mistura (*Série b*)

Identificação da argamassa	Identificação da mistura de finos	Parâmetros da composição		
		Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%
A.MS.55.I.FC.0,80.8-10°C-25L	40C1+60FC	0,80	0,70	0,340
A.MS.55.I.FC.0,80.8-22°C-25L				

4.3.4-Influência da dosagem de superplastificante (*Série c*)

Outro dos parâmetros referenciados inicialmente como influente no fenómeno da retenção da trabalhabilidade das argamassas é a dosagem de superplastificante. Neste caso, a solução encontrada para avaliar este parâmetro foi um pouco diferente das anteriores, no que respeita à mistura e seus constituintes.

Uma vez que na argamassa de referência não é possível aumentar a quantidade de superplastificante (Sp/p%) sem fazer variar consideravelmente as propriedades reológicas desta, apostou-se na realização de uma mistura ternária.

A escolha do terceiro material constituinte da mistura recaiu sobre a microssílica, uma vez que, mesmo utilizada em pequena quantidade, proporciona um aumento significativo do superplastificante na mistura, conforme concluem os trabalhos de Nepomuceno [18], tornando a argamassa auto-compactável sem que provoque uma alteração significativa da resistência inicial.

Mantendo a mistura com 40% de cimento portland, fez-se variar apenas a percentagem de adição de fíler de calcário inicial da argamassa de referência (60%), introduzindo, em substituição parcial desta, pequenas quantidades de microssílica. Foram então definidas duas misturas ternárias para se avaliar a influência da dosagem de superplastificante na retenção da trabalhabilidade, uma com a introdução de 2% de microssílica e a outra com a introdução de 4% de microssílica.

Os parâmetros chave não foram inicialmente definidos recorrendo a modelos teóricos, mas sim experimentais. A abordagem inicial para se “acertar” esta argamassa, foi no sentido de aumentar significativamente a percentagem de superplastificante que havia sido utilizada anteriormente na argamassa de referência. No Quadro 4.6 resumem-se os parâmetros chave obtidos para cada uma das misturas desta série.

Quadro 4.6 - Identificação e resumo dos parâmetros da composição da mistura (Série c)

Identificação da argamassa	Identificação da mistura de finos	Parâmetros da composição		
		Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8-2%-25L	40C1+58FC+2MS	0,80	0,64	0,50
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8-4%-25L	40C1+56FC+4MS	0,80	0,67	0,60

4.4- Métodos de ensaio

4.4.1-Preparação dos materiais

Como referido anteriormente, todos os materiais necessários para a realização das argamassas encontravam-se acondicionados no laboratório.

Uma consideração importante está relacionada com as areias utilizadas, tanto a Areia 0/2 como a Areia 0/4, que estavam armazenadas em barricas e saturadas de água. Tal facto obrigou a um esforço diário adicional no sentido de corrigir as misturas em função do teor em

água superficial das areias antes de efectuar qualquer amassadura, uma vez que esse valor apresentava variações significativas ao longo do tempo em que decorreu o presente estudo.

Optou-se sempre por deixar as areias espalhadas em tabuleiros plásticos nas vésperas das amassaduras, para que perdessem uma quantidade significativa de água. No entanto, e apesar de esta estratégia ter dado os seus frutos, aplicou-se sistematicamente o procedimento descrito na especificação do LNEC E249-1971 [8] para avaliar o teor em água superficial das areias.

4.4.2- Metodologia de produção e de acerto das argamassas

Numa primeira fase, e tendo por base os parâmetros chave obtidos para cada tipo de argamassa, foi necessário acertar experimentalmente os parâmetros V_w/V_p e $Sp/p\%$.

A sequência de amassadura que serviu de referência para a realização deste trabalho, foi a utilizada por Nepomuceno [18]. Na Figura 4.7, encontra-se ilustrado, de modo simplificado, o procedimento desta amassadura. O tempo da mistura foi controlado por um cronómetro. De referir que se efectuou uma paragem do cronómetro nos 3 minutos para limpeza das pás e recipiente de amassadura.

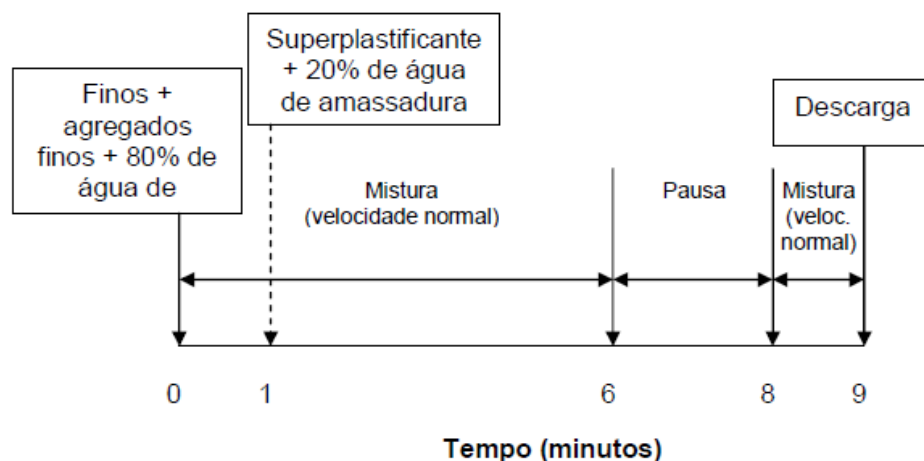


Figura 4.7 - Sequência de amassadura [18]

Para a execução das misturas foi utilizada uma misturadora programável destinada à produção de pastas e argamassas normalizadas (Figura 4.8), que equipa o Laboratório de Tecnologia e Ensaios Mecânicos do DECA da UBI. Todavia todo o processo de amassadura foi controlado manualmente.



Figura 4.8 - Misturadora utilizada na produção das argamassas

Nesta fase realizaram-se amassaduras de 1,6 litros para que o acerto fosse preciso e económico no que respeita às quantidades de materiais. As dosagens foram calculadas através de uma folha de Excel proposta por Nepomuceno [18], que basicamente segue a rotina e expressões de cálculo já descritas no Item 2.2.2.3 do Capítulo 2 deste documento.

Para se obter uma maior precisão, todos os materiais foram medidos em massa utilizando balanças de precisão existentes no laboratório. Os agregados finos, cimento e adições foram colocados no recipiente de amassadura sem qualquer ordem definida. Seguidamente adicionou-se a água e por último o superplastificante já no decorrer da amassadura. Terminada a amassadura, realizaram-se os ensaios de “Slump flow” (espalhamento) e Funil-V (escoamento) para avaliar indirectamente a reologia da argamassa através dos parâmetros Gm e Rm.

O processo de acerto da argamassa foi repetido sucessivamente para cada uma das séries de argamassas em estudo até que a sua reologia se enquadrasse no intervalo de variação ou “alvo” proposto por Nepomuceno [18], como é possível vislumbrar na Figura 2.14 do Capítulo 2, na qual, se verifica que o valor de Gm varia entre 5,3 e 5,9 e o valor de Rm deve estar compreendido entre 1,14 e 1,30. Tais intervalos correspondem em termos de ensaio, a um diâmetro de espalhamento entre 251 mm e 263 mm, e um tempo de escoamento no funil-V que deve variar entre os 7,69 e os 8,77 segundos.

4.4.3-Metodologia de avaliação da retenção da trabalhabilidade

Finalizado todo o processo de acerto das argamassas das várias séries, procedeu-se à fase seguinte, ou seja, à avaliação da retenção da trabalhabilidade em função do tempo.

Com esse intuito, pensou-se reproduzir em laboratório o processo de transporte que o betão enfrenta desde a sua amassadura na central de produção até chegar à obra onde será aplicado. Foi então necessário produzir as argamassas das diferentes séries em grande escala. Respeitando rigorosamente todos os parâmetros chave definidos na parte de acerto das argamassas das diferentes séries, voltou-se a utilizar a folha de Excel de Nepomuceno [18] para calcular as quantidades, desta feita para amassaduras de 25 litros. Para a produção em grande escala, utilizou-se uma betoneira misturadora de mistura forçada que equipa o laboratório (Figura 4.9). Os procedimentos de medição dos materiais constituintes e o processo de amassadura das argamassas, embora em grande escala, foram em tudo semelhantes aos descritos anteriormente.



Figura 4.9 - Betoneira misturadora que equipa o laboratório

Para cada uma das séries de argamassas realizaram-se sucessivos ensaios reológicos (“Slump flow” e Funil-V) com intervalos de 15 minutos durante aproximadamente 2 horas (120 min.), de forma a tornar perceptível o comportamento reológico de cada argamassa ao longo do tempo. Nos sub-capítulos seguintes, descreve-se o procedimento dos ensaios adoptados.

4.4.4-Descrição dos ensaios adoptados

4.4.4.1- Ensaio de espalhamento

Para a execução deste ensaio foi utilizada a própria bancada junto à misturadora das argamassas. A superfície apresentava-se lisa, nivelada e sem qualquer tipo de obstrução ao escoamento (Figura 4.10). Com um pano húmido limpou-se previamente a superfície da bancada e o cone do ensaio.



Figura 4.10 - Cone do ensaio de espalhamento

Terminada a amassadura, encheu-se completamente o cone do ensaio com a argamassa, como é possível observar na Figura 4.11. De seguida rasou-se a superfície da argamassa no topo do tronco cónico.

Com o cone completamente cheio de argamassa, é necessário pousar com cuidado na bancada o recipiente que contem a argamassa de forma a não provocar vibração na mesma. Com ajuda das duas mãos, deve levantar-se o cone de forma a deixar a argamassa deformar-se uniformemente sobre a superfície (Figura 4.12), atingindo o seu diâmetro máximo, que acontece quando o movimento finda.



Figura 4.11 - Enchimento do cone de ensaio com argamassa



Figura 4.12 - Espalhamento da argamassa

Finalmente, colocam-se quatro provetes no limite do “círculo de espalhamento” em ambas as direcções, de modo a auxiliarem a medição do diâmetro de espalhamento através de uma régua (Figura 4.13). O diâmetro médio de espalhamento (D_m) corresponde à média dos diâmetros medidos nas duas direcções perpendiculares.

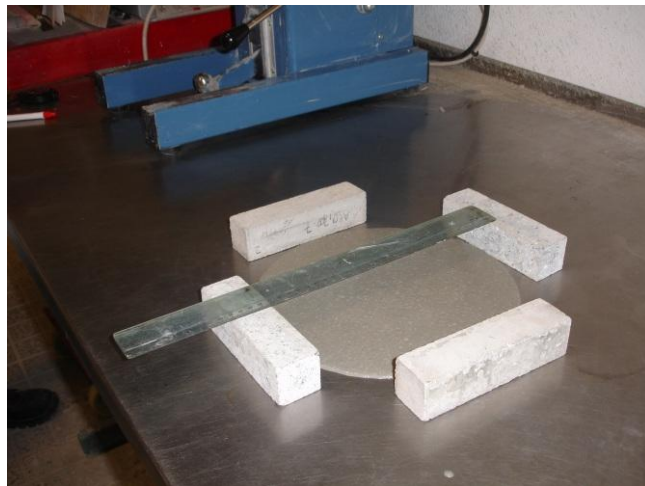


Figura 4.13 - Medição do diâmetro de espalhamento

O resultado deste ensaio também pode ser apresentado através da determinação da área de espalhamento relativa, traduzida pela seguinte expressão retirada do método de Okamura *et al* [23,24]:

$$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0} \right)^2 - 1 \quad (3.1)$$

Onde:

G_m é a área de espalhamento relativa;

D_m é o Diâmetro médio de espalhamento, em mm;

D_0 é o diâmetro inicial na base do cone, em mm.

4.4.4.2- Ensaio de fluidez

Para a realização deste ensaio, o funil foi colocado numa superfície nivelada, de modo a que durante o ensaio se mantivesse firme, permitindo assim que o escoamento da argamassa se realizasse de forma correcta. O funil foi previamente molhado, passando-se seguidamente ar comprimido sobre o mesmo, de modo a deixar apenas as suas superfícies humedecidas.

Após a amassadura encheu-se totalmente o funil com a argamassa (Figura 4.14 e 4.15), de modo a deixar a superfície nivelada. Não se utilizou qualquer tipo de compactação.



Figura 4.14 - Enchimento do Funil-V



4.15 - Pormenor do enchimento do Funil-V

Em seguida, num movimento coordenado, abre-se a comporta situada na base do funil e ao mesmo acciona-se o cronómetro, dando início à contagem do tempo de escoamento através do funil (Figura 4.16 e 4.17). A contagem do tempo de escoamento termina quando, olhando para o interior do funil de cima para baixo, for possível vislumbrar o primeiro raio de luz.



Figura 4.16- Escoamento da argamassa no Funil-V



Figura 4.17 - Pormenor do escoamento

O resultado do ensaio é expresso pelo tempo de escoamento (t) em segundos, ou então, através da determinação da velocidade de escoamento desenvolvida no método de Okamura *et al* [23,24]:

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

Onde:

Rm é a velocidade relativa de escoamento, em s^{-1} ;

t é o tempo de escoamento, em segundos.

4.4.5-Preparação de provetes para ensaios à compressão

Para todas as séries produzidas, sempre que se obteve a argamassa com as propriedades reológicas adequadas, procedeu-se à moldagem de três provetes prismáticos com as dimensões de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ em dois tempos distintos, aos 0 minutos (após finalizada a amassadura) e aos 120 minutos, para serem realizados posteriormente ensaios à compressão (Figura 4.18).



Figura 4.18 - Exemplo de provetes para ensaios à compressão

Os provetes moldados foram mantidos durante 24 horas no interior do laboratório à temperatura ambiente, sendo depois descofrados e colocados na câmara de cura à temperatura de 20 ± 2 °C e uma humidade relativa de 93% (Figura 4.19).



Figura 4.19 - Mostrador da câmara de cura

De acordo com a Especificação do LNEC E255 [9], foram ensaiados para cada argamassa três provetes à compressão com 7 dias de idade, e outros três provetes ensaiados com 28 dias.

4.4.6-Ensaio de compressão

Como referido anteriormente, foram realizados para cada argamassa ensaios aos 7 dias e aos 28 dias de idade. Os procedimentos foram os mesmos, independentemente dos dias de cura. Os provetes seleccionados foram retirados da câmara de cura imediatamente antes do ensaio, apresentando-se saturados e com a superfície seca. De seguida efectuou-se uma pesagem e registou-se o valor para que posteriormente fosse possível estimar a massa volúmica aparente.

Após a pesagem, cada um dos provetes prismáticos foi dividido sensivelmente ao meio por flexão. Os ensaios de compressão efectuaram-se com recurso a uma prensa semi-automática normalmente usada para o ensaio de betões e que equipa o laboratório (Figura 4.20). Entre os pratos da prensa foi colocado um adaptador para o ensaio à compressão de argamassas (Figura 4.21). A taxa de compressão foi de 1,5 kN/s.



Figura 4.20 - Prensa de ensaios à compressão



Figura 4.21 - Adaptador utilizado na prensa para os ensaios em argamassas

Capítulo 5- Apresentação e discussão dos resultados

5.1- Introdução

Após a realização dos trabalhos experimentais, apresentam-se e discutem-se neste capítulo os resultados obtidos durante esses processos, desde a caracterização dos materiais utilizados na fase experimental, até aos estudos realizados nas diversas argamassas.

A apresentação e discussão dos resultados tiveram como base a argamassa de referência, possibilitando assim estabelecer comparações e correlações com as diferentes séries ensaiadas, focando preferencialmente o fenómeno da retenção de trabalhabilidade na fase de argamassa para betões auto-compactáveis.

De forma a seguir a ordem anteriormente delineada no Capítulo 4, a apresentação dos resultados será apresentada de forma semelhante, começando pela caracterização dos materiais utilizados no Sub-capítulo 4.2, definição das curvas de referência dos agregados finos e por fim os resultados obtidos no estudo das diversas argamassas.

5.2- Caracterização dos materiais utilizados

5.2.1-Ligantes

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de ligantes, de forma a ser possível verificar a influência do tipo de cimento na retenção da trabalhabilidade. Apresenta-se no Quadro 5.1 a massa volúmica obtida para cada um desses ligantes e a sua respectiva finura.

Quadro 5.1 - Massa volúmica e finura dos ligantes

Material		Massa volúmica	Finura [cm ² /g]
Tipo	Designação comercial	Valor médio [kg/m ³]	
Ligante	CEM I 42,5R	3140	3848*
Ligante	CEM II/B-L 32,5N	3040	4617*

*Blaine

5.2.2-Adições

O fíler de calcário foi a adição mineral do tipo I escolhida para a realização deste trabalho, enquanto que, como adição do tipo II se optou pela microssílica. No Quadro 5.2, apresenta-se o valor da massa volúmica destes materiais e no Quadro 5.3 a sua finura.

Quadro 5.2 - Massa volúmica do Fíler de calcário e microssílica

Material		Massa volúmica
Tipo	Designação comercial	Valor médio [kg/m ³]
Adição tipo I	Betoncard P1-OU (Fíler calcário)	2720
Adição tipo II	Sikacrete HD (Microssílica)	2170

Quadro 5.3 - Finura das adições

Material		Finura [cm ² /g]
Tipo	Designação comercial	
Adição tipo I	Betoncard P1-OU (Fíler calcário)	5088*
Adição tipo II	Sikacrete HD (Microssílica)	1295*

*Analisador de partículas a laser Coulter LS200

A análise da distribuição de partículas das adições minerais testadas no analisador de partículas a laser Coulter LS200 é apresentada nas Figuras 5.1 e 5.2

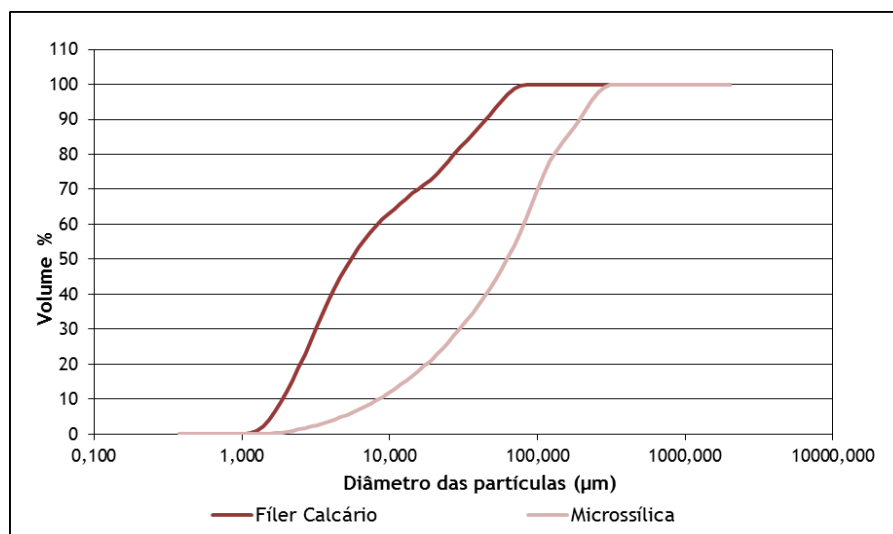


Figura 5.1 - Análise da distribuição das partículas das adições no Coulter LS200 (valor acumulado)

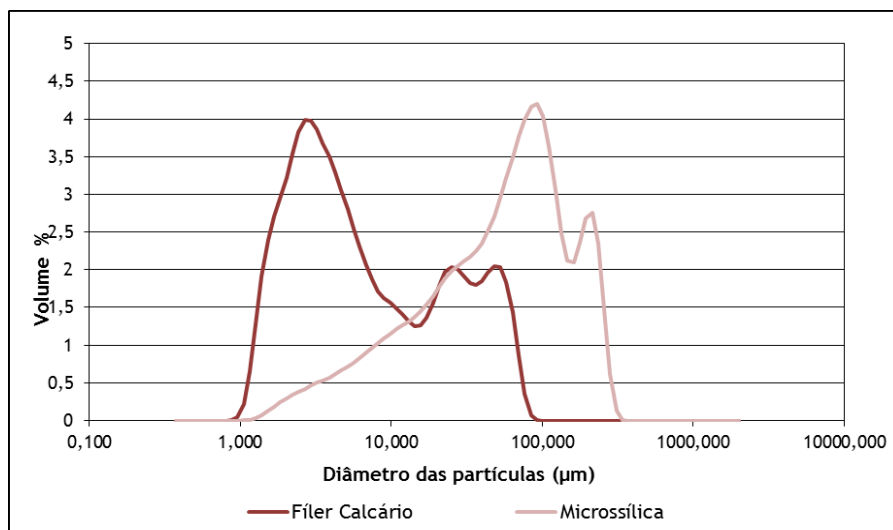


Figura 5.2 - Análise da distribuição das partículas das adições no Coulter LS200 (valor diferencial)

5.2.3-Agregados

Para a realização das diversas argamassas estudadas utilizaram-se as Areias 0/2 e 0/4 existentes no laboratório. Para cada um desses agregados finos, realizaram-se ensaios para determinar a massa volúmica, a absorção de água e a distribuição granulométrica. Adicionalmente, como foram muitas as argamassas estudadas e a sua amassadura ocorreu em dias diferentes, realizaram-se vários ensaios diariamente para avaliar de forma correcta o teor de água superficial das areias. Os resultados então obtidos foram introduzidos na folha de cálculo das argamassas de modo a acertar automaticamente a quantidade de água a introduzir na amassadura.

No Quadro 5.4 são apresentados os resultados obtidos na determinação da massa volúmica e absorção de água das duas areias. A análise granulométrica dos agregados finos é apresentada no Quadro 5.5, estando representada graficamente na Figura 5.3.

Quadro 5.4 - Massa volúmica e Absorção de água das areias

Material (Designação comercial)	Massa volúmica [kg/m ³]	Absorção de água
Areia 0/2	2600	$A_{a1}\% = 0.43$
Areia 0/4	2630	$A_{a2}\% = 0.93$

Quadro 5.5- Análise granulométrica dos agregados finos

Peneiro	Malha (mm)	Areia 0/2	Areia 0/4
		Percentagem acumulada de material passado pelos peneiros	
3"	76,20	100,00	100,00
(*) 2"	(*)50,80	100,00	100,00
1" 1/2	38,10	100,00	100,00
(*) 1"	(*)25,40	100,00	100,00
3/4"	19,10	100,00	100,00
(*) 1/2"	(*)12,70	100,00	100,00
3/8"	9,52	100,00	100,00
nº 4	4,76	100,00	99,88
nº 8	2,38	99,96	94,77
nº 16	1,190	99,62	71,59
nº 30	0,590	73,48	28,00
nº 50	0,297	13,36	1,96
nº 100	0,149	0,98	0,34
nº 200	0,074	0,12	0,14
Resíduo		0,00	0,00
Módulo de Finura		2,126	3,035
(*) Série secundária			
Peneiros para o cálculo do módulo de finura			

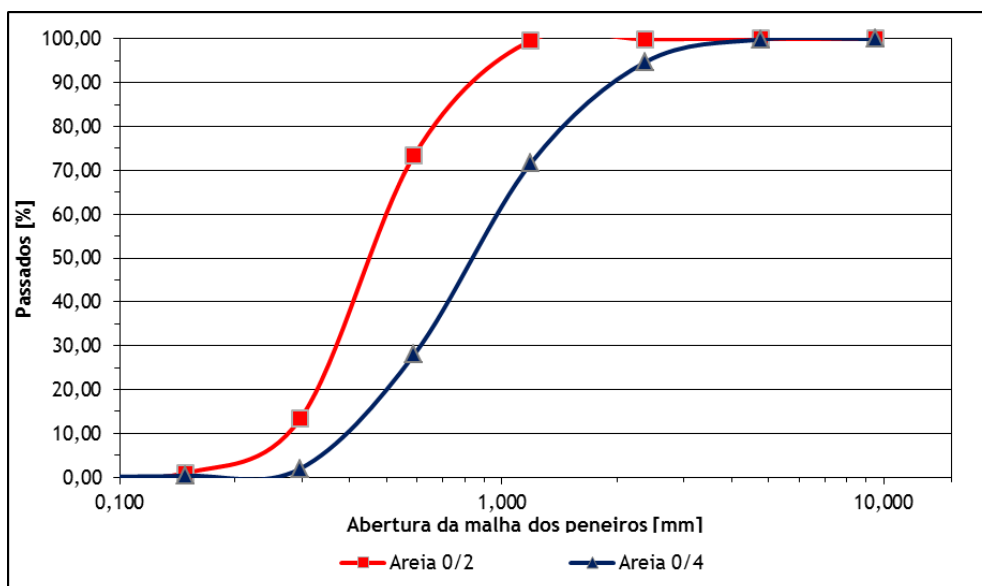


Figura 5.3 - Curvas granulométricas dos agregados finos (areias)

5.2.4-Adjuvantes

O adjuvante utilizado em todo o trabalho experimental foi o superplastificante Sika Viscocrete 3005, produzido pela SIKA. Trata-se de um superplastificante redutor de água de alta gama à base de carboxilatos modificados. No Quadro 5.6 estão especificadas as suas características.

Quadro 5.6 - Características do superplastificante

Sika Viscocrete 3005	
Base	Policarboxilatos modificados
Aspecto	Líquido castanho claro
Massa volúmica	1,05±0,02 kg/l
pH (23±2°C)	4,0±1,0
Dosagem para SCC (BAC)	1,0% a 1,4% da massa do cimento

5.3- Curvas de referência dos agregados finos

O Quadro 5.7 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para a curva real. Estes resultados encontram-se graficamente comparados com a curva de referência proposta por Nepomuceno [18] para agregados finos, como apresenta a Figura 5.4.

Quadro 5.7 - Mistura da curva real e de referência dos agregados finos

Peneiro	Malha (mm)	Areia 0/2 - Betão Liz	Areia 0/4 - Betão Liz	Mistura (Curva Real)	Mistura (Curva Ref.)	Erro médio percentual
		a1	a2			
		0,50	0,50			
Percentagem de passados						
3/6"	9,520	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
N.º 4	4,760	100,00	99,88	99,94	99,96	0,03
N.º 8	2,380	99,96	94,77	97,37	99,12	1,76
N.º 16	1,190	99,62	71,59	85,61	90,81	5,20
N.º 30	0,590	73,48	28,00	50,74	62,30	11,56
N.º 50	0,297	13,36	1,96	7,66	21,05	13,39
N.º 100	0,149	0,98	0,34	0,66	4,72	4,06
N.º 200	0,074	0,12	0,14	0,13	0,85	0,72
Resíduo		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura						
		2,126	3,035	2,580	2,220	4,079

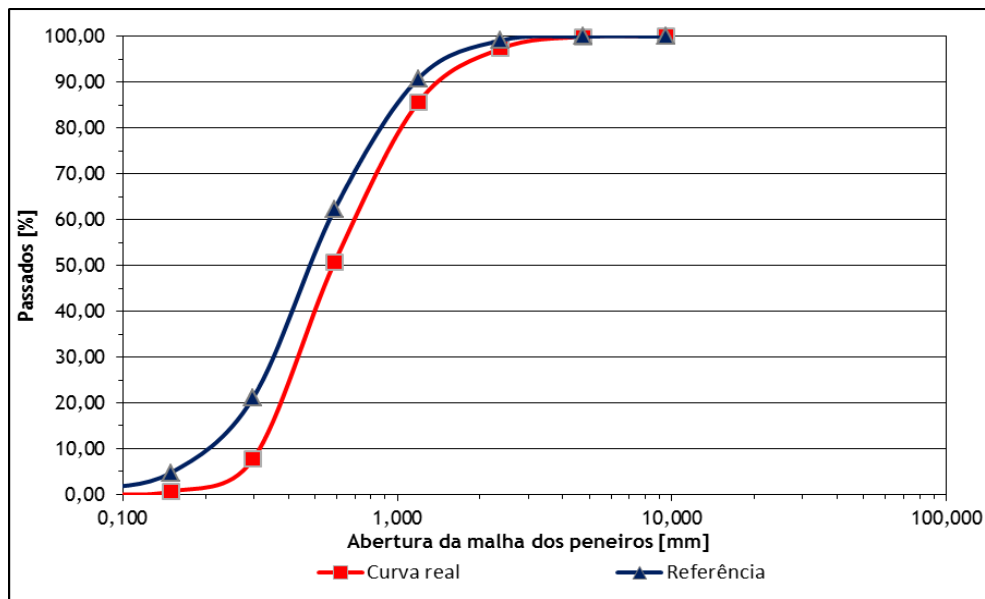


Figura 5.4 - Curvas granulométricas das misturas de agregados finos (real e de referência)

Como é possível constatar através da observação do Quadro 5.7 e da Figura 5.4, a curva real e a curva de referência apresentam módulos de finura muito próximos entre si. Neste contexto, importa referir que seria possível aproximar ainda mais a curva real à curva de referência, aumentando-se a contribuição da Areia 0/2. No entanto, no presente trabalho optou-se por não aumentar excessivamente a quantidade da areia mais fina (Areia 0/2), por esta apresentar normalmente maiores variações nos teores em água superficial e ser, em consequência, mais difícil de controlar a amassadura. Tentou-se assim colocar a percentagem de Areia 0/2 no limite máximo considerado aceitável, resultando num equilíbrio de 50% para cada tipo de areia. A escolha revelou-se adequada, visto o módulo de finura da curva real (2,58) se encontrar no intervalo que se admite ser aceitável para betões auto-compactáveis (2,4 a 2,6).

5.4- Caracterização da argamassa de referência

5.4.1- Influência das dosagens de água e de superplastificante

Como foi referido anteriormente, toda a investigação foi desenvolvida a partir da denominada argamassa de referência. Neste item caracteriza-se essa argamassa de referência, avaliando a influência das dosagens de água e de superplastificante nas propriedades reológicas iniciais, utilizando um procedimento em tudo semelhante àquele descrito nos estudos experimentais apresentados por Ouchi *et al* [26].

Numa primeira fase foram determinados experimentalmente os valores de V_w/V_p e de $Sp/p\%$ necessários à obtenção das propriedades reológicas da argamassa adequadas à produção de

betões auto-compactáveis, tendo-se obtido, respectivamente, os valores de 0,70 e 0,34. Posteriormente, fixou-se o parâmetro de V_w/V_p em 0,70 e fez-se variar as dosagens de superplastificante ($Sp/p\%$). Os resultados obtidos para os parâmetros G_m e R_m face à variação de $Sp/p\%$ estão ilustrados nas Figuras 5.5 e 5.6.

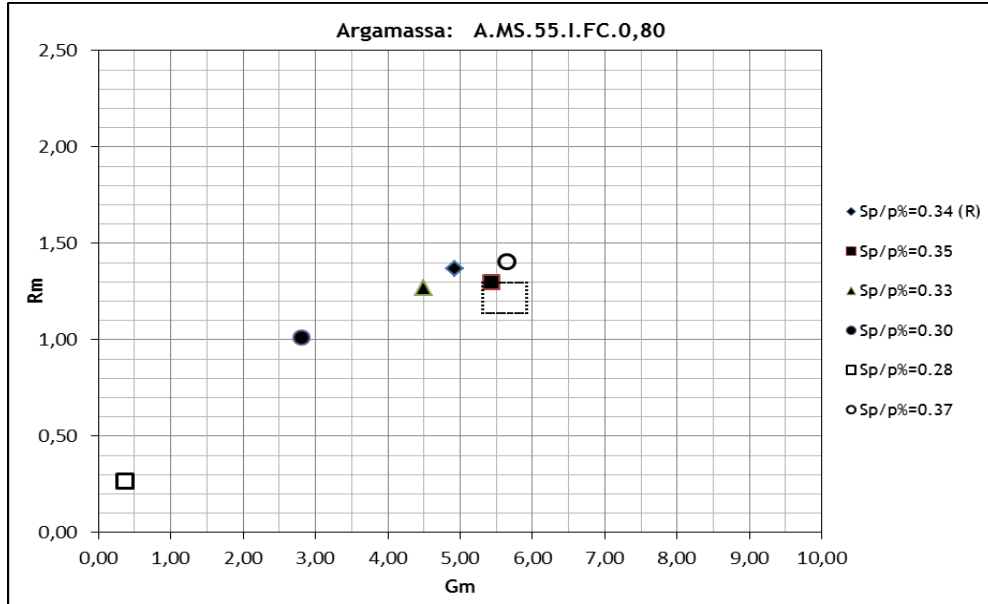


Figura 5.5 - Influência da dosagem de superplastificante nas propriedades reológicas iniciais da argamassa de referência

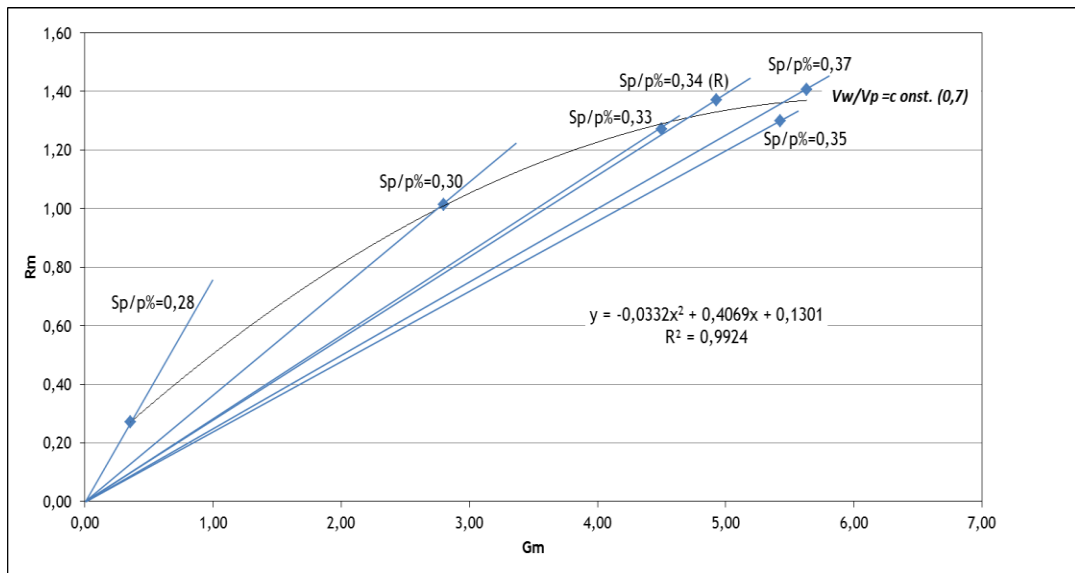


Figura 5.6 - Dosagens de superplastificante testadas na argamassa de referência

Através dos resultados obtidos experimentalmente, quando V_w/V_p se manteve constante e se fez variar o parâmetro $Sp/p\%$, é possível confirmar os pressupostos de Ouchi *et al* [26]. Obtiveram-se vários pares de valores para as diferentes dosagens de superplastificante ($Sp/p\%$) testadas.

Para facilitar o visionamento e análise dos valores obtidos, traçaram-se a partir da origem rectas auxiliares que passam nos pontos obtidos para as diferentes dosagens de Sp (Figura 5.6). É possível constatar que, para um Vw/Vp constante, as rectas auxiliares das dosagens de superplastificante (Sp/p%) mostram que a inclinação destas decresce à medida que aumenta a dosagem do superplastificante. Tal como Ouchi *et al* [26] sugerem, a inclinação será um bom indicador da dosagem de Sp/p% para Vw/Vp constante. Essa inclinação é obtida pela relação Gm/Rm já que a recta intercepta a origem. Expressando então a dosagem de Sp/p% em função da inclinação (Gm/Rm) obtém-se o gráfico ilustrado na Figura 5.7.

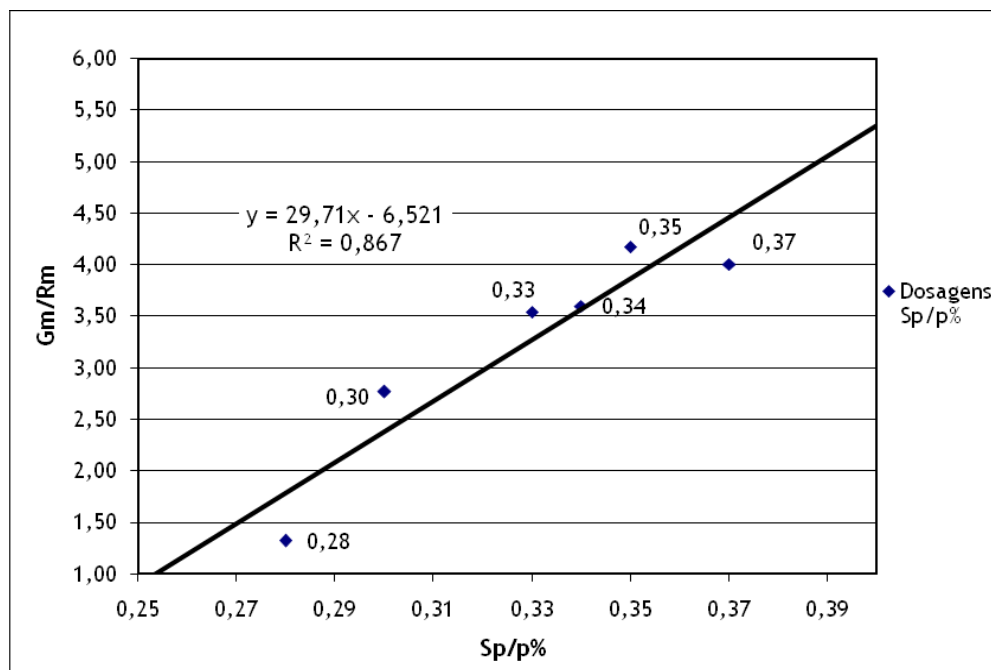


Figura 5.7 - Dosagem de Sp/p% em função de Gm/Rm

Os resultados obtidos confirmam as premissas assumidas por Ouchi *et al* [26], ou seja, permitem quantificar a dosagem de Sp/p% em função de Gm/Rm, neste caso para Vw/Vp=0,70. Em resultado da análise efectuada, poderá dizer-se que será possível numa fase posterior estimar a dosagem de Sp/p% na mistura de referência com Vw/Vp=0,70 em função de Gm/Rm através da Equação 5.1 obtida no gráfico da Figura 5.7.

$$y = 29,71x - 6,5213 \quad (5.1)$$

Numa segunda fase, procedeu-se de forma inversa, ou seja, fixou-se o valor de Sp/p% obtido anteriormente para a argamassa de referência (0,34) e fez-se variar as dosagens de água (Vw/Vp). O resultado obtido está ilustrado nas Figuras 5.8 e 5.9. Como é possível verificar na Figura 5.9, os resultados obtidos vão ao encontro dos pressupostos de Ouchi *et al* [26], ou seja, para um Sp/p%=0,34 e acréscimos sucessivos de Vw/Vp, os pares de valores obtidos (Gm, Rm) descrevem sensivelmente uma recta. A linha de tendência traçada no gráfico da Figura 5.9 representa o Sp/p% constante, sendo possível verificar que os pontos obtidos para

as diferentes dosagens de V_w/V_p estudadas se mantêm praticamente na mesma linha e aumentam no sentido ascendente desta.

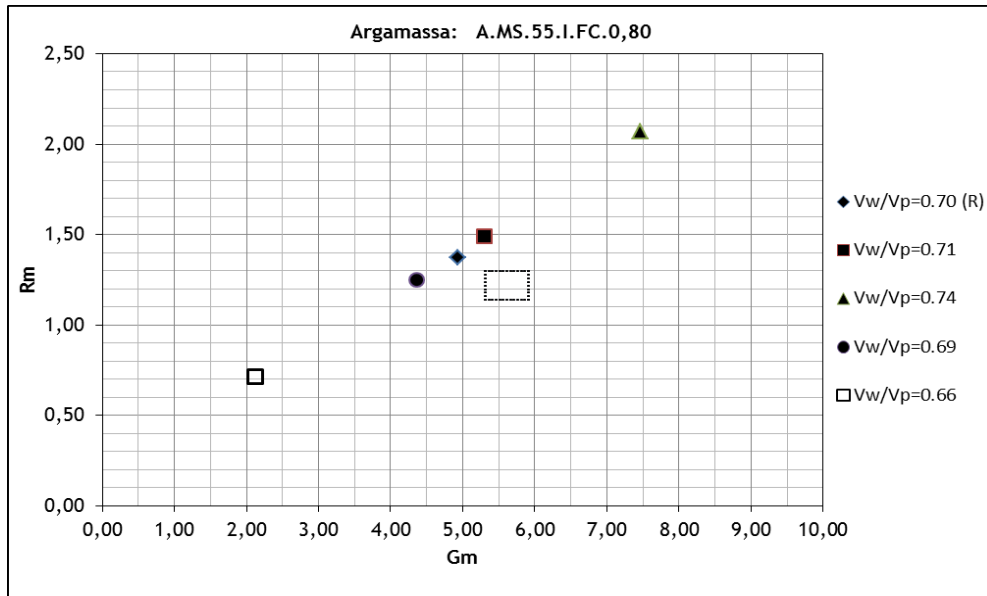


Figura 5.8 - Influência da dosagem de água nas propriedades reológicas iniciais da argamassa de referência

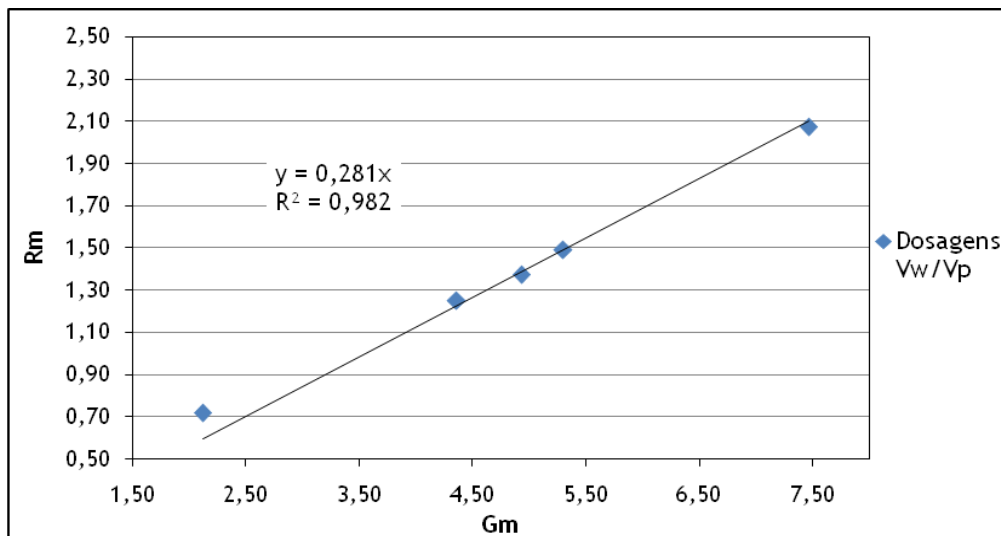


Figura 5.9 - Dosagens de água testadas na argamassa de referência

De forma a linearizar os resultados obtidos anteriormente, recorreu-se mais uma vez aos pressupostos obtidos por Ouchi *et al* [26] e concebeu-se o gráfico da Figura 5.10 que relaciona $R_m/G_m^{0,4}$ com a dosagem de V_w/V_p .

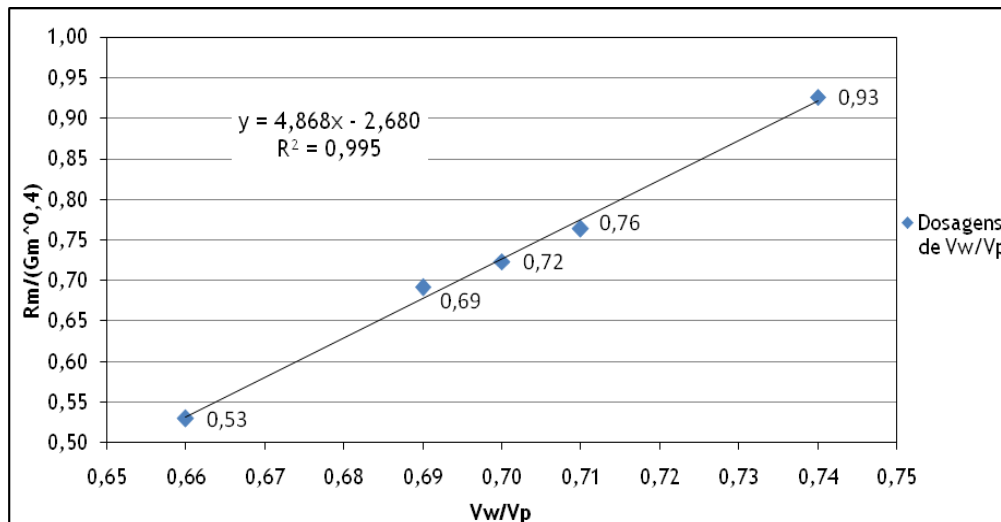


Figura 5.10 - Dosagem de Vw/Vp em função de Rm/(Gm^{0,4})

A relação ilustrada no gráfico da Figura 5.10 possibilita numa fase mais avançada, estimar a dosagem de Vw/Vp na mistura de referência para Sp/p%=0,34 em função de Rm/(Gm^{0,4}) através da Equação 5.2.

$$y = 4,8683x - 2,6806 \quad (5.2)$$

5.4.2-Avaliação da retenção da trabalhabilidade da argamassa de referência

Como referido no Capítulo anterior, realizou-se uma amassadura de 25 litros com o intuito de avaliar a retenção de trabalhabilidade na argamassa de referência. Os resultados dos ensaios reológicos efectuados ao longo do tempo decorrido após a amassadura são apresentados no Quadro 5.8 e ilustrados graficamente na Figura 5.11. O desenvolvimento da curva obtida para o par de valores (Gm, Rm), representada na Figura 5.11, é muito semelhante àquele obtido na argamassa de referência quando se manteve Vw/Vp constante e se fez variar Sp/p%, (Figura 5.5) indiciando que a perda de trabalhabilidade se deveu apenas, ou em grande parte, à dosagem de superplastificante, ou melhor, à perda de capacidade de dispersão do superplastificante.

Quadro 5.8 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura

Argamassa de Referência			
A.MS.55.I.FC.0,80.8 - 25L			
Série	Tempo de ensaio [min]	Valores Medidos	
		Gm	Rm
1	0	6,56	1,44
	15	4,18	1,20
	30	2,94	1,06
	45	1,79	0,77
	60	1,02	0,46
	75	0,23	0,22

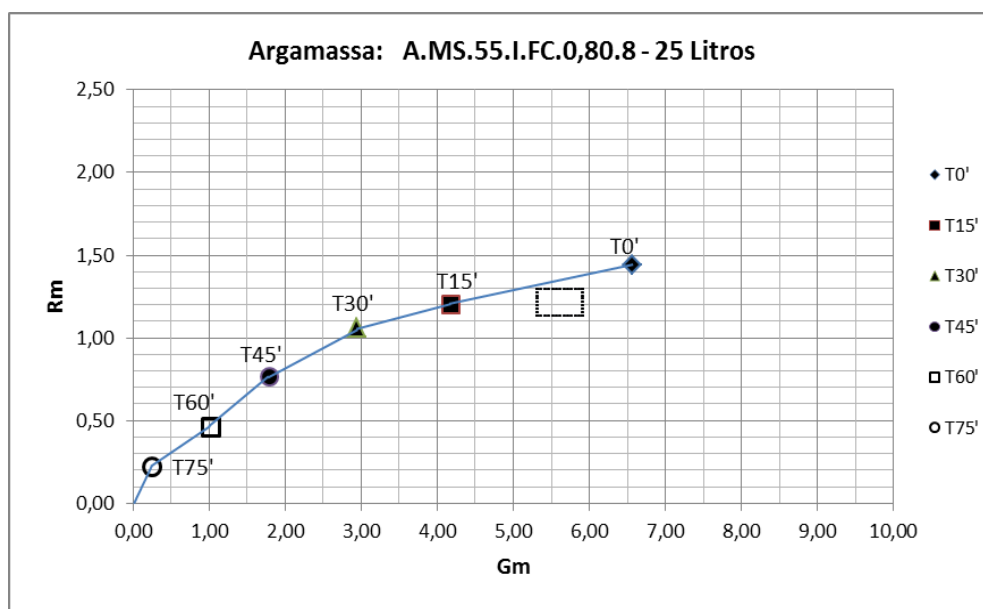


Figura 5.11 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura

Face à análise efectuada e partindo-se do princípio de que a razão V_w/V_p não sofre variações significativas nos primeiros instantes após a amassadura, é possível avaliar indirectamente o efeito do superplastificante na perda de trabalhabilidade, verificando a variação da razão G_m/R_m ao longo do tempo (Figura 5.12).

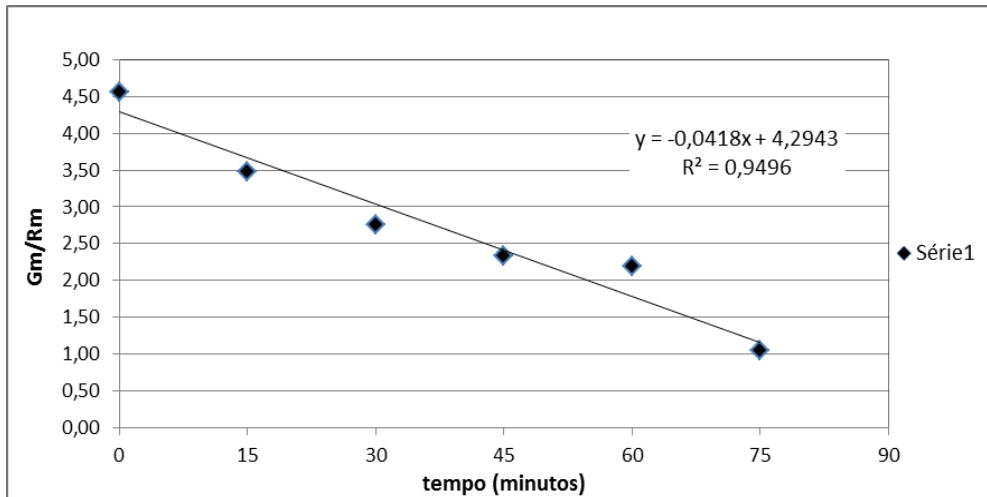


Figura 5.12 - Variação da razão Gm/Rm em função do tempo decorrido após amassadura

Da mesma forma, e se por hipótese o Sp/p% for considerado constante, é possível avaliar a variação da razão Vw/Vp ao longo do tempo através da razão $Rm/(Gm^{0,4})$, conforme se representa na Figura 5.13.

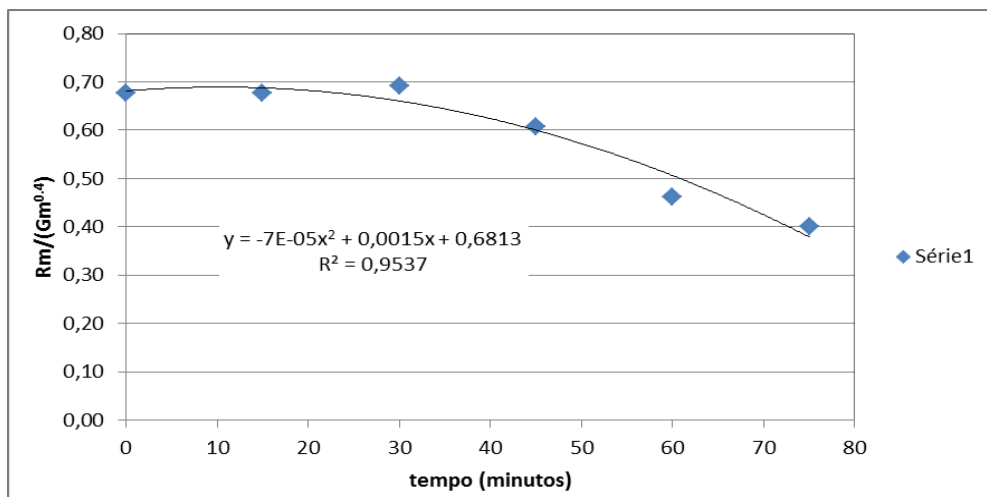


Figura 5.13 - Variação da razão $Rm/(Gm^{0,4})$ em função do tempo decorrido após amassadura

Efectuando uma análise mais atenta das Figuras 5.12 e 5.13, parece ser possível confirmar a hipótese inicial de que a perda de trabalhabilidade se deve, em grande parte, à perda do efeito dispersante do superplastificante, na medida em que a razão Gm/Rm, directamente relacionada com a dosagem de Sp/p%, decresce significativamente ao longo do tempo, enquanto que a razão $Rm/(Gm^{0,4})$ que está relacionada com Vw/Vp mostra um patamar quase constante até aos 45 minutos e um ligeiro decréscimo após esta fase. Não obstante, este ligeiro decréscimo pode merecer interpretações distintas, ou seja, pode dever-se ao próprio consumo de água da reacção de hidratação do cimento e/ou dever-se também ao facto da alteração do efeito do superplastificante ser significativo, ao ponto de invalidar a aplicação directa da Equação obtida no gráfico da Figura 5.10.

Foi possível também, a partir das Equações 5.1 e 5.2 obtidas anteriormente, estimar com maior precisão as variações que as razões V_w/V_p e $S_p/p\%$ sofreram em cada instante após a amassadura da argamassa de referência. Esses valores estão resumidos no Quadro 5.9 seguinte.

Quadro 5.9 - Estimativa das razões V_w/V_p e $S_p/p\%$ a partir dos parâmetros G_m e R_m

Argamassa de Referência							
A.MS.55.I.FC.0,80.8 - 25L							
Série	Tempo de ensaio [min]	Valores Medidos				Valores Estimados	
		G_m	R_m	G_m/R_m	$R_m/G_m^{0,4}$	$S_p/p\%$ (Eq. 5.1)	V_w/V_p (Eq. 5.2)
1	0	6,56	1,44	4,56	0,68	0,37	0,69
	15	4,18	1,20	3,48	0,68	0,34	0,69
	30	2,94	1,06	2,76	0,69	0,31	0,69
	45	1,79	0,77	2,34	0,61	0,30	0,68
	60	1,02	0,46	2,19	0,46	0,29	0,65
	75	0,23	0,22	1,04	0,40	0,25	0,63
2*	90	9,24	1,99	4,64	0,82	0,38	0,72
	105	6,34	1,79	3,55	0,85	0,34	0,73
	120	5,05	1,61	3,14	0,84	0,33	0,72

*Após adição de 20g de Superplastificante

A partir dos valores estimados para as razões $S_p/p\%$ e V_w/V_p foi possível conceber os gráficos apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15 que ilustram o comportamento destas razões ao longo do tempo.

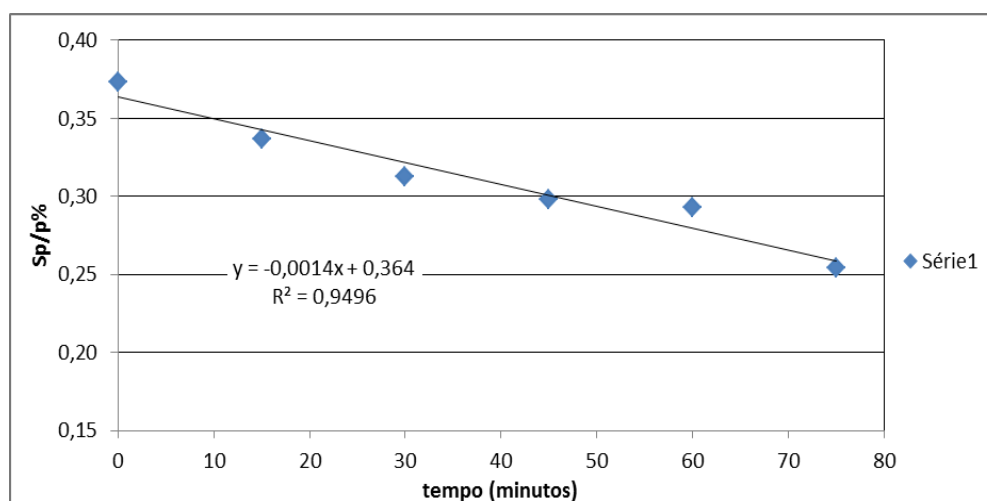


Figura 5.14 - Variação de $S_p/p\%$ em função do tempo após amassadura obtida por estimativa

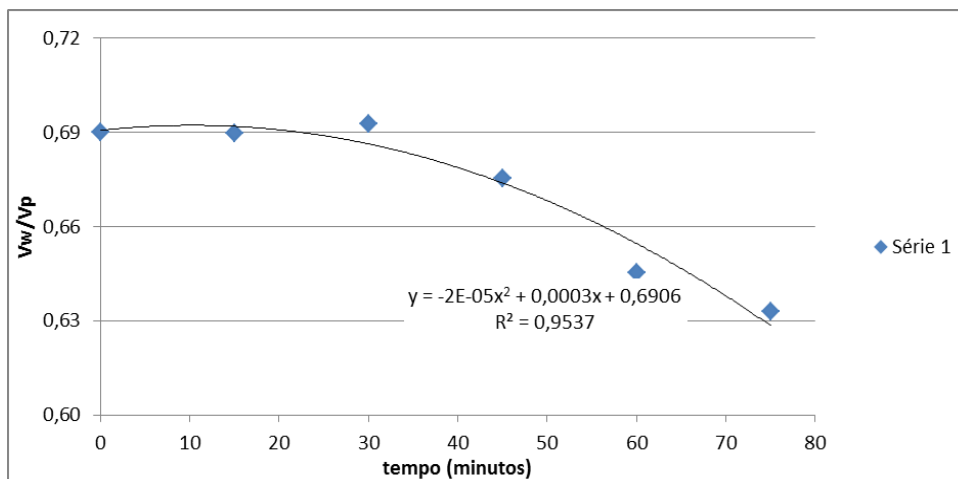


Figura 5.15 - Variação de Vw/Vp em função do tempo após amassadura obtida por estimativa

Estes resultados poderão ser úteis mais tarde na avaliação da retenção da trabalhabilidade, ao permitirem avaliar a razão de Sp/p% e Vw/Vp em função do tempo, tendo como base os parâmetros reológicos Gm e Rm obtidos em cada medição ao longo do tempo, tendo como intermediário as equações obtidas ao linearizar os gráficos de Gm e Rm em função de Sp/p% e Vw/Vp.

Admitindo a concepção de um betão auto-compactável de referência tendo por base a argamassa de referência estudada nesta dissertação, estimaram-se as quantidades de W e Sp (expressas em litros) necessárias para repor a trabalhabilidade perdida em função do tempo.

No Quadro 5.10 e 5.11, apresentam-se os parâmetros chave e as quantidades de amassadura do betão auto-compactável de referência.

Quadro 5.10 - Parâmetros chave do betão auto-compactável de referência

BAC de referência				
Identificação do betão	Identificação da mistura de finos	Parâmetros da composição		
		Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
BAC Referência	40C1+60FC	0,80	0,69	0,34

Quadro 5.11 - Dosagens para o betão auto-compactável de referência

Quantidades de amassadura por m ³		
Material	Quantidade	Unidades
C1=	286,12	kg
FC=	371,77	kg
W=	159,46	litros
Sp=	2,13	litros
S1=	370,18	kg
S2=	374,45	kg
G1=	400,88	kg
G2=	399,40	kg

O Quadro 5.11, apresenta em destaque as quantidades de W e Sp necessárias para proporcionar a trabalhabilidade desejada ao BAC de referência. Tendo por base esta mistura, utilizaram-se os valores estimados de Sp/p% e Vw/Vp obtidos anteriormente através das Equações 5.1 e 5.2 (Quadro 5.9), seguidamente, recorreu-se à folha de cálculo de Excel concebida por Nepomuceno [18] e calcularam-se os valores da variação de água e superplastificante ao longo do tempo (Quadro 5.12).

Quadro 5.12 - Variação das dosagens de água e de superplastificante ao longo do tempo após a amassadura

Tempo	ΔW [litros]	ΔSp [litros]
0	0,00	0,00
15	-0,04	0,19
30	-0,09	0,38
45	1,65	0,43
60	6,98	0,48
75	10,55	0,72

É assim possível ter uma noção aproximada das quantidades de água (W) e de superplastificante (Sp) que seria necessário adicionar à mistura de betão, de modo a que a trabalhabilidade perdida ao longo do tempo seja parcialmente recuperada.

De forma a tornar perceptível o conceito da recuperação de trabalhabilidade, apresentam-se seguidamente os gráficos (Figura 5.16 e 5.17) obtidos através dos valores anteriormente calculados, que demonstram de uma forma concreta o procedimento a cumprir no que diz respeito à reposição de água e superplastificante na mistura.

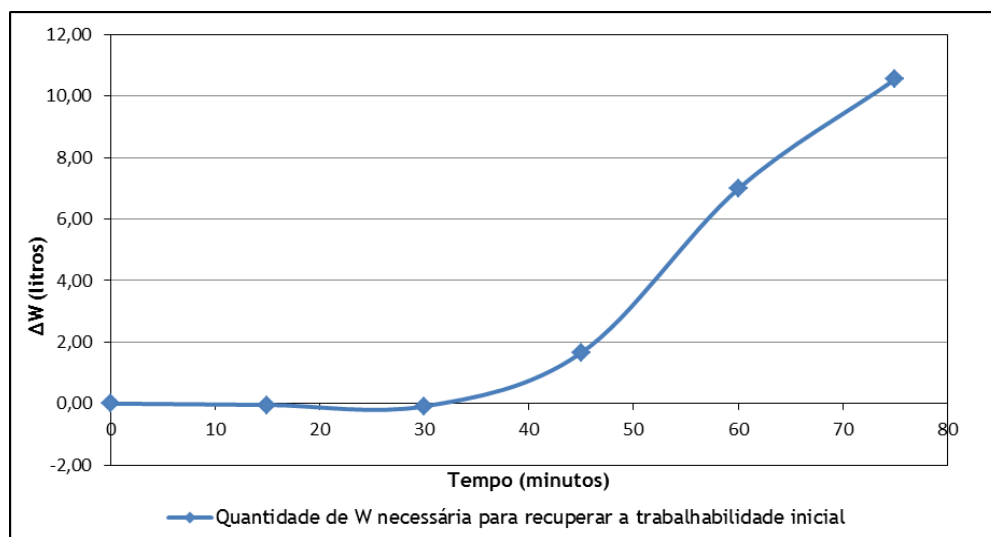


Figura 5.16 - Quantidade de água necessária ao longo do tempo após amassadura para repor a trabalhabilidade inicial num betão com a argamassa de referência

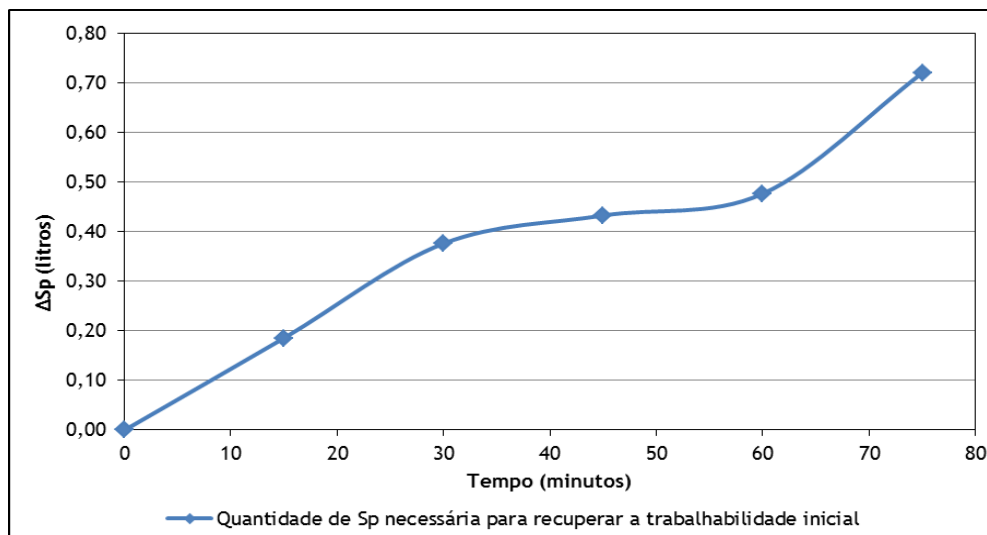


Figura 5.17- Quantidade de superplastificante necessário ao longo do tempo após amassadura para repor a trabalhabilidade inicial num betão com a argamassa de referência

Os gráficos anteriores (Figura 5.16 e 5.17) apresentam sem dúvida resultados interessantes no que respeita ao fenómeno de recuperação de trabalhabilidade. Numa primeira observação é possível verificar e confirmar a “suspeita” anteriormente levantada, de que, o superplastificante é o factor com maior responsabilidade na trabalhabilidade de argamassas e betões.

É facilmente perceptível que para recuperar a trabalhabilidade até um período de tempo próximo dos 30 minutos “basta” introduzir na argamassa a quantidade de superplastificante (quantidade válida apenas para o BAC de referência em estudo) indicada pelo gráfico, enquanto ao nível de água a introduzir não apresenta quantidades significativas, parecendo mesmo ser nulas.

Na fase inicial após a amassadura a quantidade de água necessária a repor na mistura para recuperação de trabalhabilidade apresenta um comportamento peculiar, baixando mesmo a valores negativos (embora mínimos). Tal facto pode estar relacionado com o cálculo do valor de V_w/V_p ter sido efectuado através da Equação 5.2 e esta por sua vez apresentar um erro significativo. Porém, não condiciona em nada a óptima análise que estes dados proporcionam.

Para uma noção mais abrangente e conclusiva é possível dizer que para um período de tempo de 75 minutos após amassadura é necessário para esta mistura de BAC introduzir 10,55 litros de água e 0,72 litros de superplastificante para que a mistura recupere a trabalhabilidade inicial. Este processo que foi realizado de modo teórico, foi também testado de uma outra forma é certo, na Série 2, adicionando superplastificante à mistura quando esta já se encontrava com trabalhabilidade reduzida.

Fazendo referência à Série 2 que foi introduzida no Quadro 5.9, é de salientar que a ideia de obter esta nova série surgiu no decurso dos trabalhos, quando se verificou que a perda de

trabalhabilidade se devia em grande parte à perda de acção dispersante do superplastificante. Entendeu-se então adequado testar a recuperação da trabalhabilidade mediante a introdução de uma pequena quantidade deste adjuvante, numa fase em que já não era possível efectuar medições de Gm e Rm. Com esta alteração conseguiu-se que a argamassa registasse valores de Gm e de Rm próximos dos valores obtidos após a amassadura. Os resultados obtidos para as razões Sp/p% e Vw/Vp em função do tempo, estão ilustrados nos gráficos das Figuras 5.18 e 5.19.

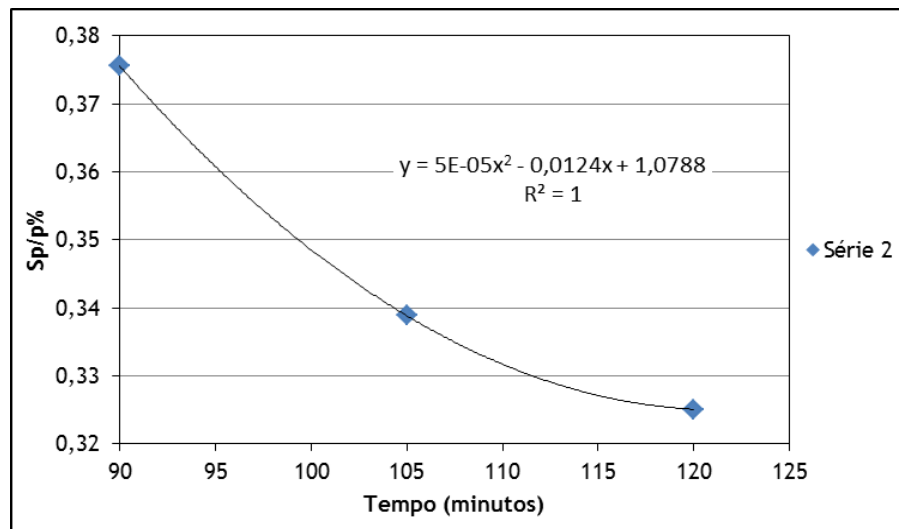


Figura 5.18 - Sp/p% em função do tempo

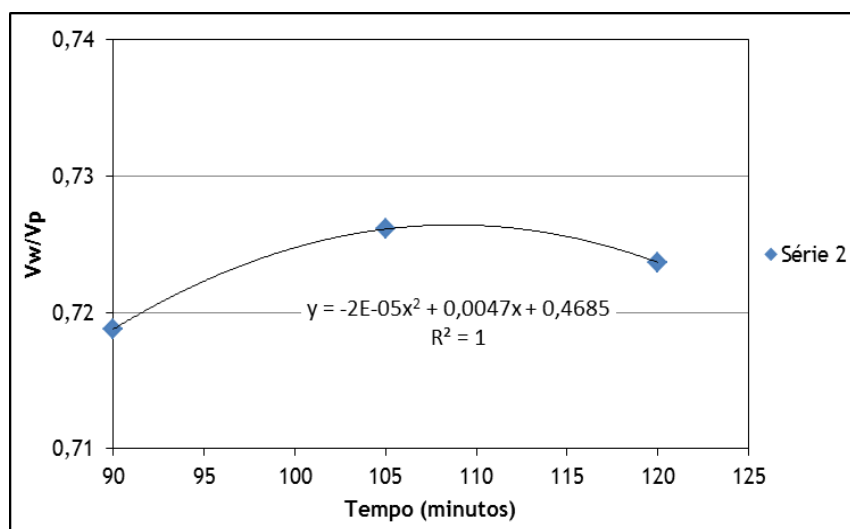


Figura 5.19 - Vw/Vp em função do tempo

O comportamento reológico da argamassa após recuperação parcial da trabalhabilidade apresenta alguns aspectos peculiares, nomeadamente, o facto da razão V_w/V_p ter aparentemente aumentado, a par do aumento da razão $S_p/p\%$. Efectivamente, a recuperação das dosagens de superplastificante para valores próximos do inicial produziu igualmente um acréscimo da razão V_w/V_p , que ultrapassou sempre o valor inicial. Isto pode eventualmente significar que parte do adjuvante superplastificante terá funcionado como parte líquida (água) por perda do seu efeito dispersante.

5.5- Influência do tipo de cimento (*Série a*)

Como descrito no Capítulo 4, realizou-se uma amassadura de 25 litros utilizando os mesmos parâmetros chave da argamassa de referência. Contudo, substituiu-se o tipo de cimento de modo a possibilitar a análise da influência deste na retenção da trabalhabilidade da argamassa.

Os valores medidos nos ensaios reológicos realizados nesta amassadura ao longo do tempo estão expostos em função de G_m e R_m no Quadro 5.13 e representados graficamente na Figura 5.20.

Quadro 5.13 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (*Série a*)

Argamassa Cimento tipo II			
A.MS.55.II.FC.0,80.7 - 25L			
Série	Tempo de ensaio [min]	Valores Medidos	
		G_m	R_m
1	0	5,23	1,27
	15	4,31	1,25
	30	2,88	0,99
	45	1,58	0,69
	60	0,64	0,35

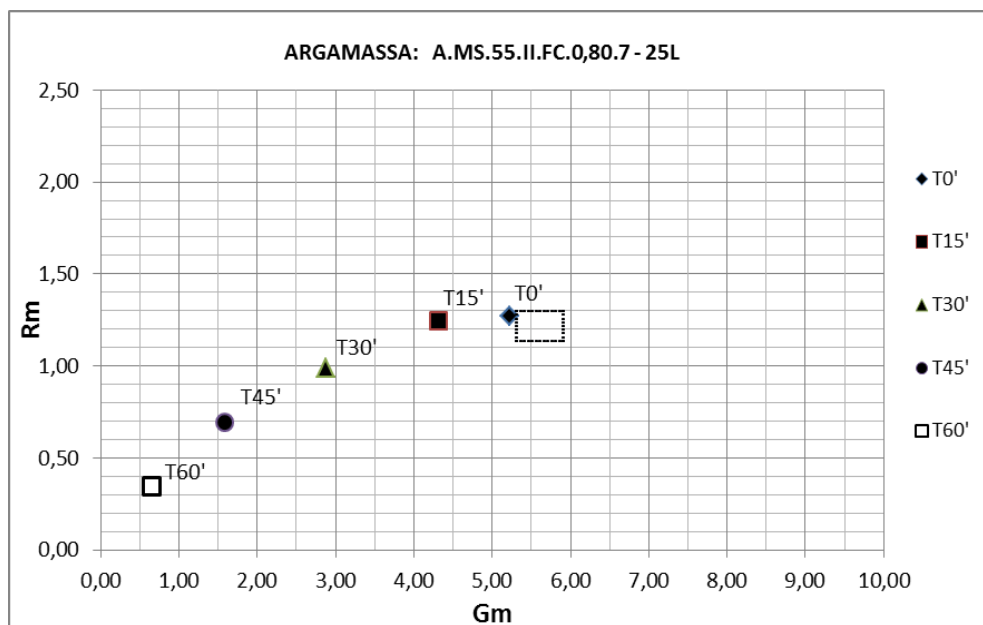


Figura 5.20 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura

O interesse fulcral desta amassadura recai na possibilidade de analisar a influência que um determinado tipo de cimento pode ter na retenção da trabalhabilidade de uma determinada argamassa. O cimento portland de calcário CEM II/B-L32,5N foi o utilizado nesta amassadura para substituir o cimento portland CEM I 42,5R da argamassa de Referência, sendo caracterizado principalmente por ter um baixo calor de hidratação e proporcionar uma boa trabalhabilidade.

Com o intuito de melhor comparar estes dois tipos de cimento, foi necessário definir uma “taxa de redução”, ou seja, utilizando os valores obtidos experimentalmente nos ensaios realizados (Gm e Rm) e expostos anteriormente para cada um deles, tentou-se equivaler o ponto inicial para que seguidamente fosse possível realizar uma comparação fiável ao longo do tempo. Assim, os valores de Gm e de Rm são expressos em termos de percentagem unitária relativa aos valores obtidos logo após a amassadura (Gm_0 e Rm_0). O resultado comparativo de Gm e Rm em função do tempo encontra-se ilustrado nos gráficos das Figuras 5.21 e 5.22.

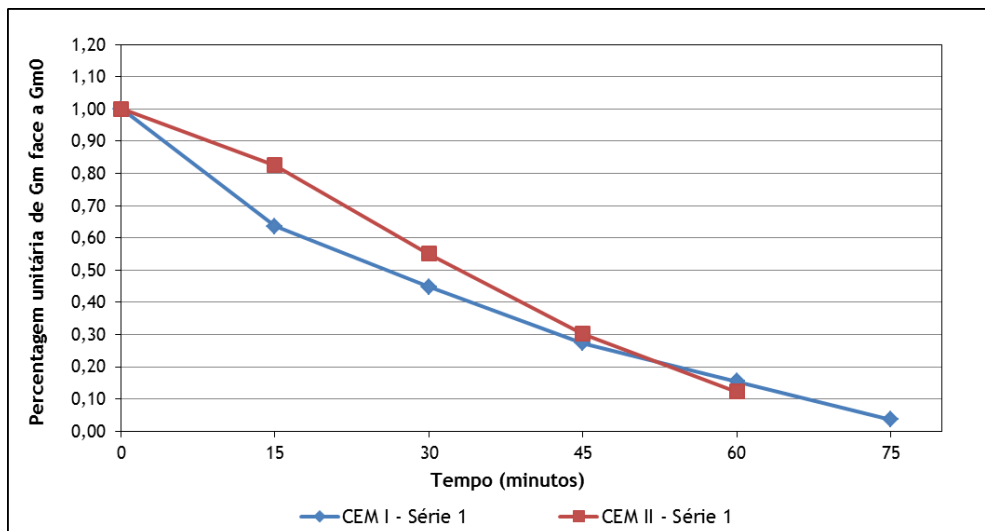


Figura 5.21 - Amassadura com diferentes tipos de cimento vs Gm em função do tempo

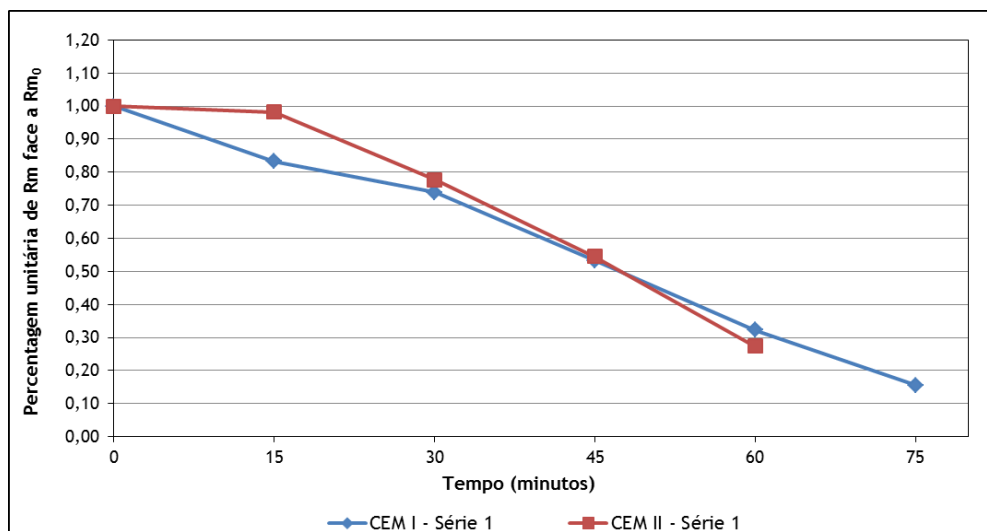


Figura 5.22 - Amassadura com diferentes tipos de cimento vs Rm em função do tempo

Analisando os gráficos das Figuras 5.21 e 5.22, é possível constatar que o CEM II/B-L32,5N utilizado nesta amassadura evidência uma menor perda de trabalhabilidade quando comparado com o CEM I 42,5R da argamassa de Referência, nomeadamente até aos 30 minutos, porém, a partir desse intervalo de tempo as curvas são praticamente sobrepostas.

Esta concordância, poderá neste caso representar, que a escolha do tipo de cimento, em princípio, é mais preponderante na fase inicial após a mistura, sendo esta diferença diluída à medida que o tempo avança. A escolha do tipo de cimento mais adequado à mistura pode realmente proporcionar uma melhor trabalhabilidade à argamassa, contudo, parece estar longe de ser o factor fundamental que afecta a retenção da trabalhabilidade da mesma. Tais resultados poderão ainda estar relacionados com facto de na mistura de Referência se ter utilizado um cimento de endurecimento rápido que proporciona um rápido e eficaz

desenvolvimento de resistências, ou seja, com este tipo de cimento é possível atingir grandes resistências nos primeiros dias após a aplicação. Pelo contrário, na mistura analisada nesta *Série a* se utilizou um cimento com um baixo calor de hidratação que proporciona uma melhor trabalhabilidade, como reflectem os resultados anteriormente apresentados para as duas amassaduras.

5.6- Influência da temperatura (*Série b*)

Depois de efectuadas as amassaduras de acordo com o descrito no Capítulo 3, apresentam-se nos sub-capítulos seguintes os resultados obtidos relativamente ao efeito da temperatura na retenção da trabalhabilidade.

5.6.1-Argamassa à temperatura de 10°C

Seguiram-se em rigor todos os procedimentos referidos na “Descrição do Programa Experimental”, de modo a reproduzir com o máximo rigor em laboratório uma argamassa que simulasse uma amassadura em condições de Inverno. Depois de realizada a mistura de 25 litros, cuja temperatura rondou os 10°C, efectuaram-se os respectivos ensaios reológicos ao longo do tempo decorrido após amassadura, cujos resultados são apresentados no Quadro 5.14 e ilustrados graficamente na Figura 5.23.

Quadro 5.14 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (*Série b* - 10°C)

Argamassa de Referência à temperatura de 10 °C			
A.MS.55.I.FC.0,80.8 - 10 °C - 25L			
Série	Tempo de ensaio [min]	Valores Medidos	
		Gm	Rm
1	0	7,61	1,80
	15	5,48	1,54
	30	3,91	1,34
	45	2,67	1,11
	60	1,74	0,83
	75	0,80	0,49

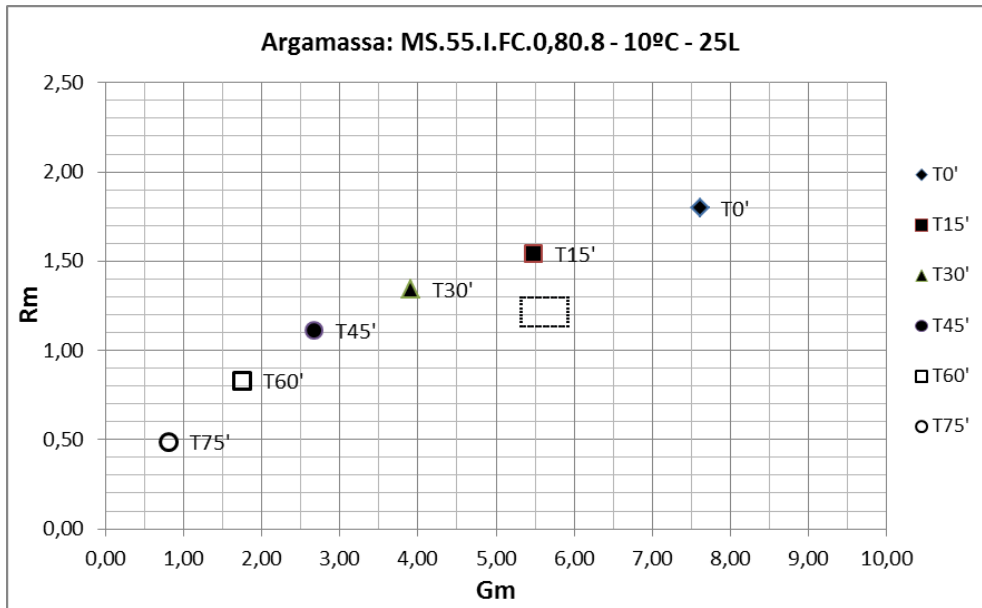


Figura 5.23- Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura

Recorrendo mais uma vez ao uso da “taxa de redução” para fazer equivaler os parâmetros Rm e Gm desta argamassa a 10 °C com os da argamassa de Referência cuja temperatura rondou os 16 °C, obtiveram-se as curvas apresentadas nos gráficos das Figuras 5.24 e 5.25.

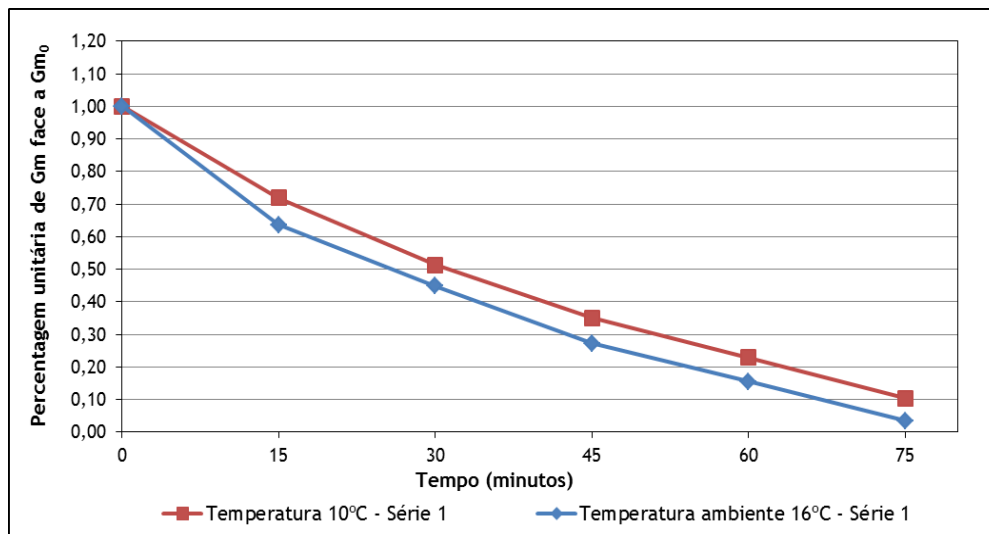


Figura 5.24 - Temperatura de amassadura vs Gm em função do tempo

Relativamente ao parâmetro Gm, que representa a área de espalhamento relativa das argamassas, é possível constatar que ao longo do tempo a argamassa cuja amassadura foi realizada à temperatura de 10°C consegue manter um maior diâmetro de espalhamento ao longo do tempo. Embora a diferença não seja muito significativa, é possível conferir que a temperatura dos materiais e da respectiva amassadura pode influenciar a trabalhabilidade da argamassa e neste caso concreto o seu diâmetro de espalhamento.

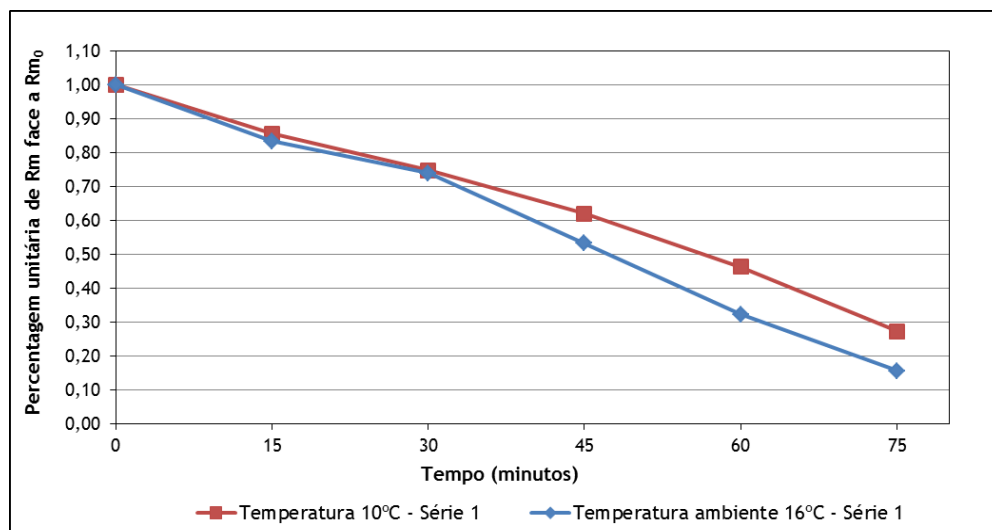


Figura 5.25 - Temperatura de amassadura vs Rm em função do tempo

Por sua vez, o parâmetro Rm, que caracteriza a velocidade relativa de escoamento, revelou na fase inicial após a amassadura e durante um período de tempo de aproximadamente 30 minutos diferenças pouco significativas em relação à argamassa de Referência, sendo que a partir deste período, começa a ser evidente a diferença do tempo de escoamento quando comparadas as duas argamassas. Poderá ser um bom indicador de trabalhabilidade da argamassa no que respeita ao parâmetro de escoamento. Para amassaduras cuja aplicação vai ocorrer num período de tempo mais alargado, esta solução de uma amassadura a temperaturas mais baixas, poderá ser uma solução válida.

Como é possível verificar, a argamassa produzida à temperatura de 10°C apresenta para ambos os parâmetros analisados anteriormente (Gm e Rm) uma inclinação menos acentuada ao longo do tempo comparativamente com a amassadura a 16°C, o que indicia uma maior capacidade de retenção da trabalhabilidade com a redução da temperatura da mistura.

5.6.2-Argamassa à temperatura de 22°C

Pensou-se que seria também interessante avaliar o comportamento de uma argamassa cuja temperatura fosse superior à registada para a argamassa de Referência (16°C). Para tal, realizou-se uma argamassa a rondar os 22°C. Como em todos os estudos anteriormente realizados, também neste caso se realizou uma amassadura de 25 litros e procedeu-se em seguida à análise do comportamento dos parâmetros reológicos ao longo do tempo. Os resultados em função de Gm e Rm encontram-se resumidos no Quadro 5.15 e expostos no gráfico da Figura 5.26.

Quadro 5.15 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (Série b - 22°C)

Argamassa de Referência à temperatura de 22 °C			
A.MS.55.I.FC.0,80.8 - 22 °C - 25L			
Série	Tempo de ensaio [min]	Valores Medidos	
		Gm	Rm
1	0	5,33	1,64
	15	3,33	1,26
	30	1,79	0,89
	45	0,59	0,33

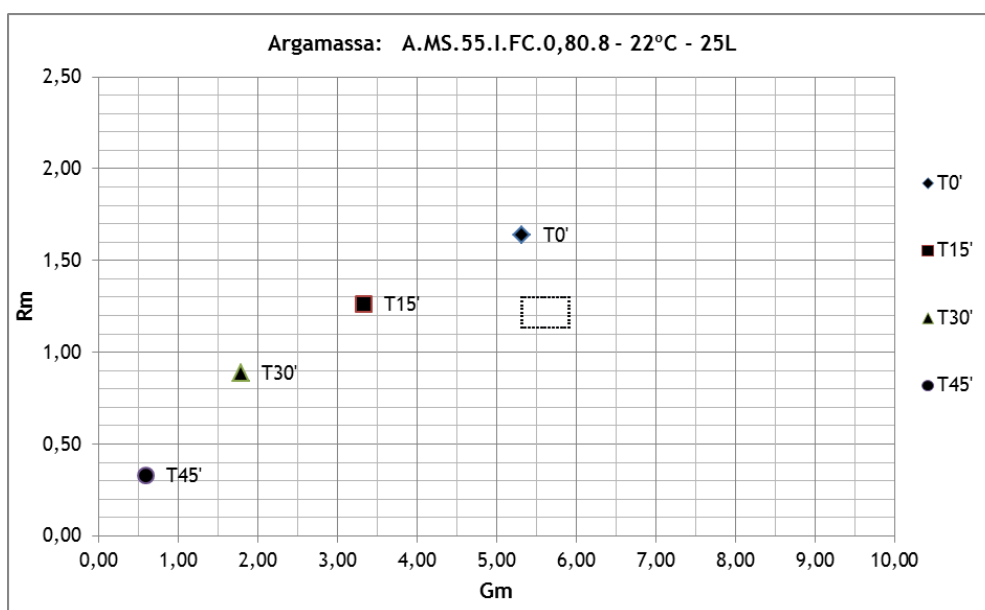


Figura 5.26 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura

Como é possível constatar através da análise do gráfico da Figura 5.26, nesta amassadura os parâmetros Gm e Rm apenas foram medidos até aos 45 minutos seguintes após a amassadura. Ao contrário das argamassas analisadas e comparadas nesta *Série b*, esta parece apresentar uma rápida perda de trabalhabilidade. Os gráficos seguintes (Figura 5.27 e 5.28), através da utilização da “taxa de redução”, estabelecem a comparação desta mistura com a argamassa de referência.

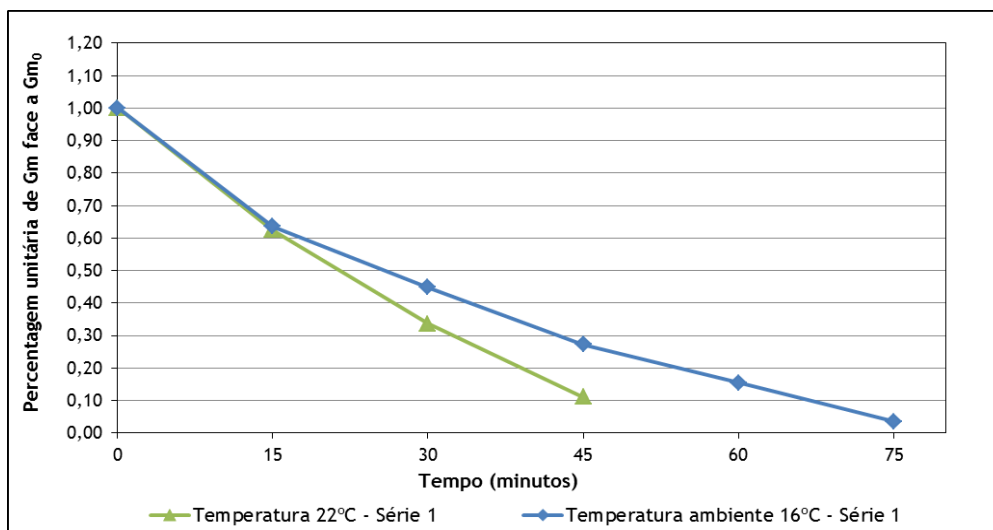


Figura 5.27 - Temperatura de amassadura vs Gm em função do tempo

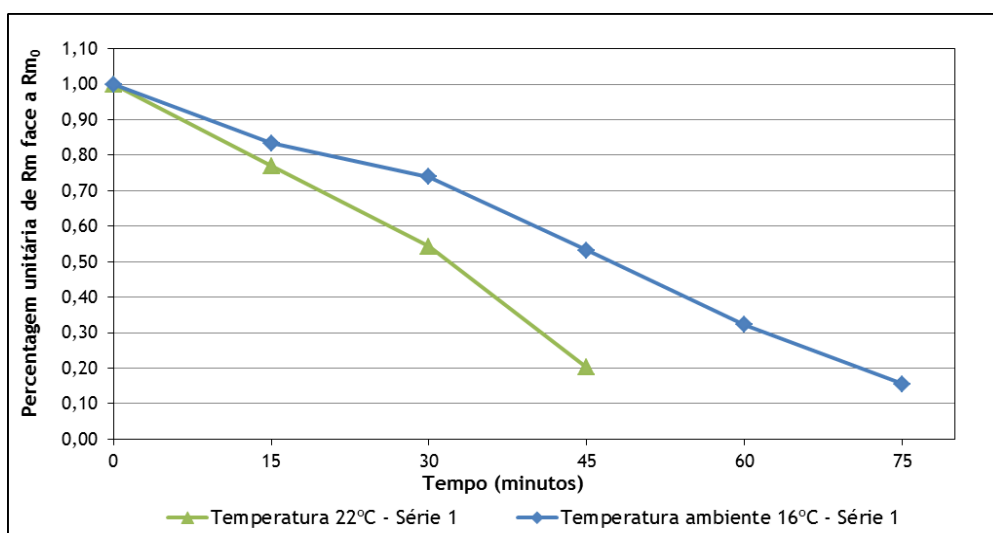


Figura 5.28 - Temperatura de amassadura vs Rm em função do tempo

Numa análise muito simplista, é possível constatar que o parâmetro Gm da argamassa em estudo neste sub-capítulo (22 °C) sofre um decréscimo repentino a partir dos 15 minutos. A última medição possível do espalhamento efectuou-se aos 45 minutos, tendo-se então obtido um valor de Gm basicamente igual ao medido na argamassa de Referência por volta dos 75 minutos. Esta enorme diferença reflecte uma grande perda de trabalhabilidade da argamassa em estudo (22 °C) no que respeita ao diâmetro de espalhamento quando comparada com a argamassa de referência produzida à temperatura de 16 °C.

Em semelhança ao parâmetro Gm, também o parâmetro Rm denota os mesmos factos, como ilustra o gráfico apresentado na Figura 5.28. Observa-se um brusco decréscimo deste parâmetro ao longo do tempo, isto é, a velocidade de escoamento diminuiu muito num curto espaço de tempo, quando comparada com a argamassa de Referência.

5.6.3-Análise comparativa da *Série b*

Relativamente à *Série b* em análise, uma primeira observação de todos os resultados apresentados leva a crer que a temperatura poderá influenciar significativamente a trabalhabilidade e a retenção da trabalhabilidade de uma argamassa.

Os dois casos ensaiados experimentalmente para esta série (10°C e 22°C) tiveram o objectivo de simular em laboratório condições opostas, ou seja, uma amassadura realizada em tempo frio e outra em tempo quente. Os parâmetros chave utilizados nas duas foram rigorosamente os mesmos da argamassa de referência, excepção feita à temperatura dos materiais e, em consequência, da amassadura.

Os gráficos seguintes (Figura 5.29 e 5.30) expõem os resultados obtidos para as argamassas desta série, relacionando, respectivamente, a área de espalhamento relativa e a velocidade relativa de escoamento em função do tempo.

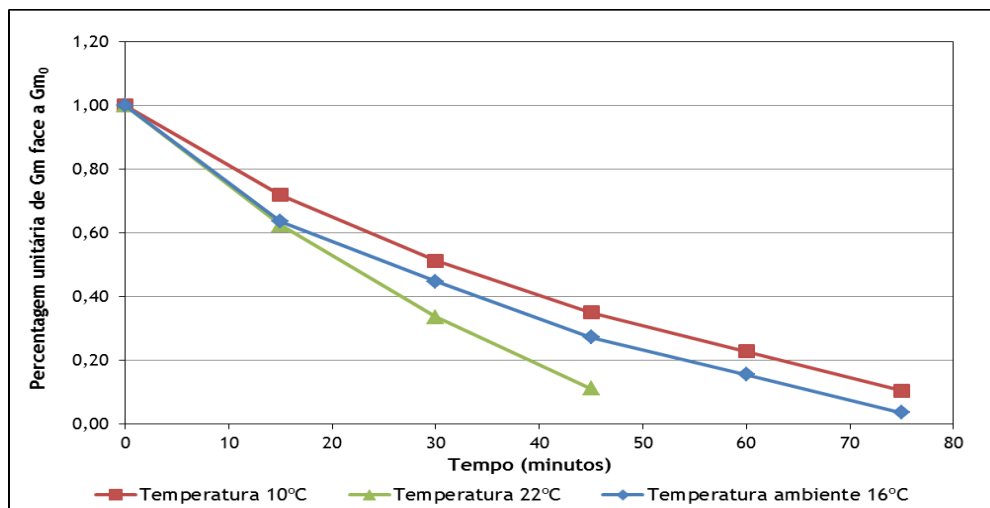


Figura 5.29 - Diferentes temperaturas de amassadura vs Gm em função do tempo

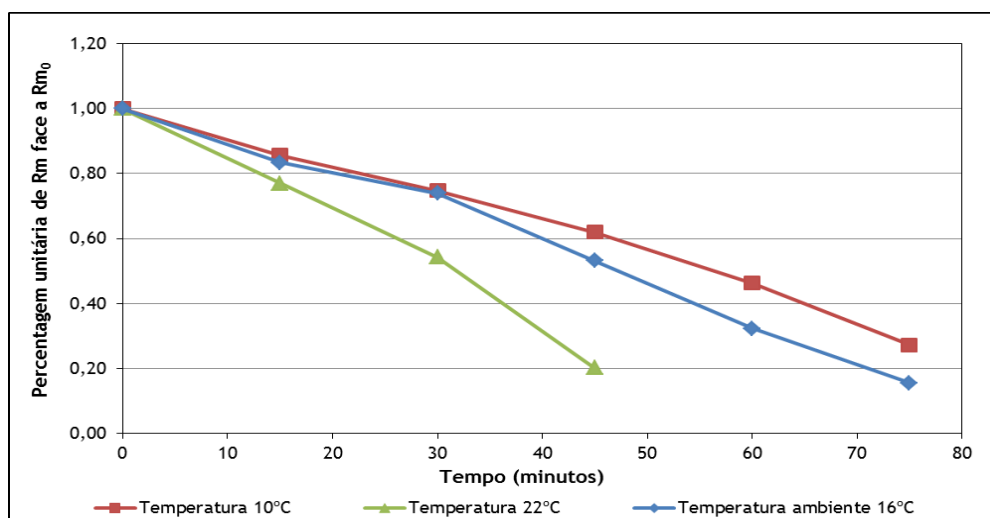


Figura 5.30 - Diferentes temperaturas de amassadura vs Rm em função do tempo

Comparando a amassadura de Referência com a realizada à temperatura de 22°C é possível perceber que, na segunda, quer a área de espalhamento relativa (Gm), quer a velocidade relativa de escoamento (Rm) sofrem uma drástica redução ao longo do tempo. Por esse facto, nessa amassadura de 22°C só foi possível obter experimentalmente medições até aos 45 minutos.

Por outro lado, relacionando a mistura à temperatura de 10°C com a argamassa de referência, verifica-se que existe uma diferença significativa, mostrando que a trabalhabilidade se mantém durante mais tempo na argamassa com temperatura inferior.

Tais factos poderão estar relacionados directamente com a hidratação do cimento e o seu consequente consumo de água “livre”. A mistura realizada à temperatura mais alta (22°C) apresenta, através dos parâmetros reológicos, uma brusca perda de trabalhabilidade quando comparada com a argamassa realizada à temperatura de 10 °C, cuja perda de trabalhabilidade vai ocorrendo gradualmente ao longo do tempo de ensaio. Aparentemente a diferença de temperaturas poderá ter influenciado a hidratação do cimento na argamassa, proporcionando assim, diferentes trabalhabilidades quando comparadas as duas argamassas.

5.7-Influência da dosagem de superplastificante (*Série c*)

Para analisar convenientemente a *Série c* utilizaram-se misturas ternárias. Como mencionado no capítulo anterior, realizaram-se duas amassaduras experimentais introduzindo pequenas quantidades de microssílica em substituição parcial do fíler de calcário, com o objectivo de “provocar” um maior consumo de superplastificante. Nos sub-capítulos seguintes apresentam-se os resultados obtidos em cada um dos casos estudados.

5.7.1-Argamassa com 2% de microssílica

Para uma primeira “tentativa”, introduziu-se na mistura de referência uma percentagem de 2% de microssílica, reduzindo o valor inicial de 60% de fíler de calcário para 58%, mantendo inalterada a percentagem de cimento na amassadura (40%). Com esta alteração registou-se um aumento da razão Sp/p% de 0,34 para 0,50, conservando idênticas propriedades reológicas comparativamente à argamassa de referência. O Quadro 5.16 e o gráfico da Figura 5.31 apresentam a variação dos parâmetros reológicos (Gm e Rm) em função do tempo decorrido após amassadura para esta argamassa.

Quadro 5.16 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (Série c - 2% de microssilica)

Argamassa com 2% de microssilica			
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 2% - 25L			
Série	Tempo de ensaio [min]	Valores Medidos	
		Gm	Rm
1	0	6,48	1,15
	15	5,33	1,14
	30	3,82	0,99
	45	2,65	0,82
	60	1,58	0,58
	75	0,84	0,25

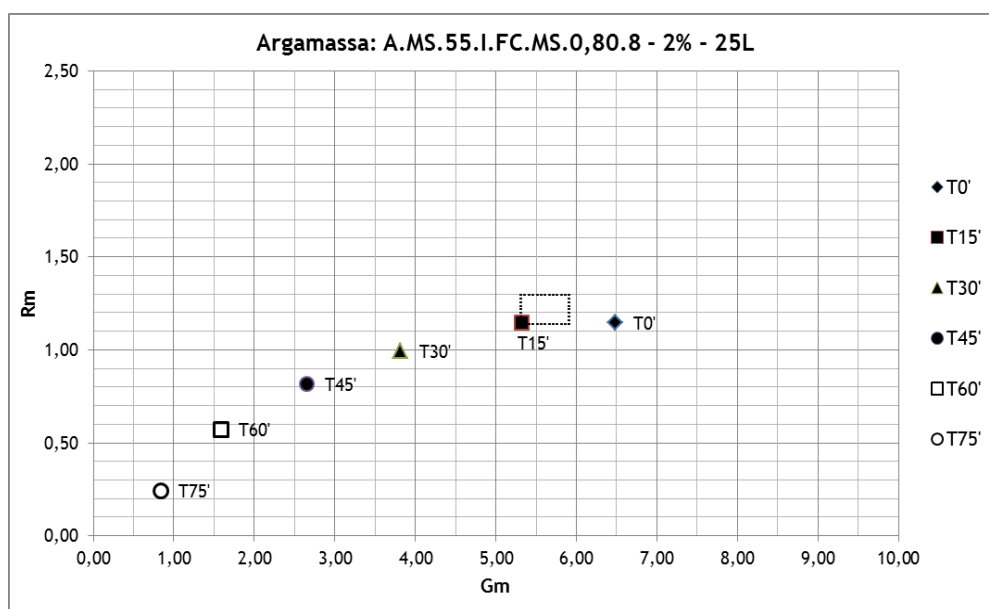


Figura 5.31 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura

Os gráficos apresentados em seguida (Figuras 5.32 e 5.33), retratam o comportamento desta mistura quando comparada com a argamassa de referência. Mais uma vez, recorreu-se a uma “taxa de redução” para comparar convenientemente e de forma equivalente as duas argamassas.

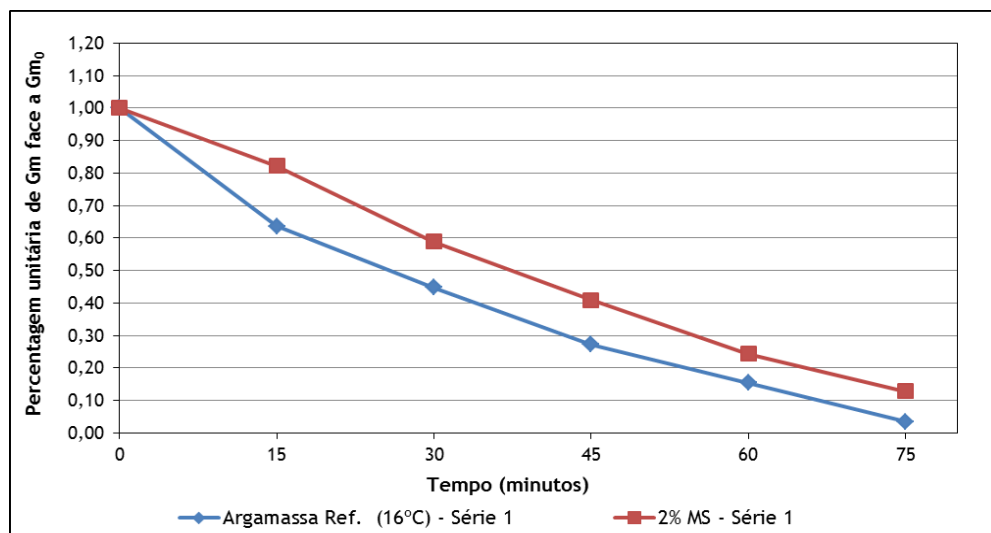


Figura 5.32 - Argamassa de referência e Argamassa com 2% de microsilica vs Gm em função do tempo

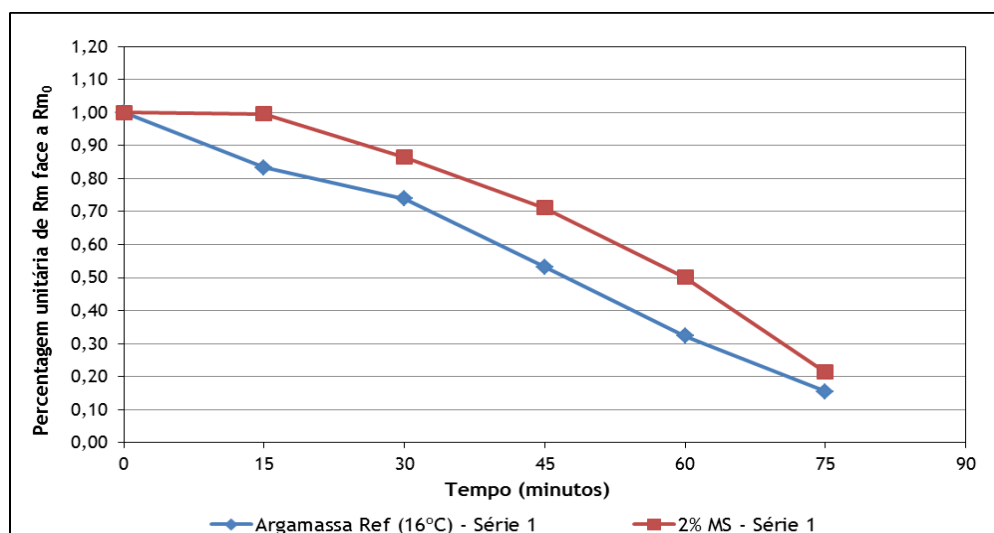


Figura 5.33 - Argamassa de referência e Argamassa com 2% de microsilica vs Gm em função do tempo

O acréscimo de 2% de microsilica na composição da mistura permitiu controlar significativamente o decréscimo do diâmetro de espalhamento ao longo do tempo (Figura 5.32). Os resultados obtidos mostraram-se promissores, ao permitirem uma melhoria na retenção da trabalhabilidade com a adição deste constituinte à mistura, mesmo que em pequenas quantidades. O mesmo se verifica no que diz respeito à velocidade relativa de escoamento ensaiada através do Funil-V (Figura 5.33). Neste caso a mistura com 2% de microsilica denota menor perda de velocidade do escoamento durante todo o período de tempo analisado experimentalmente. Tais factos são justificados pelo aumento da dosagem de superplastificante na mistura e o seu consequente contributo, permitindo assim manter a trabalhabilidade ao longo de um período de tempo mais longo quando comparada com a argamassa de referência.

5.7.2-Argamassa com 4% de microssilica

A segunda abordagem a esta *Série c* foi pensada de modo a não aumentar em demasia a quantidade de microssilica introduzida na mistura e o consequente consumo de superplastificante. Nesta argamassa foram introduzidos 4% de microssilica, reduzindo o valor inicial de 60% de fíler de calcário para 56%, mantendo inalterada a percentagem de cimento na amassadura (40%). Com esta alteração registou-se um aumento da razão Sp/p% de 0,34 para 0,60, conservando idênticas propriedades reológicas comparativamente à argamassa de referência. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 5.17 e na Figura 5.34.

Quadro 5.17 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após a amassadura (*Série c* - 4% de microssilica)

Argamassa com 4% de microssilica			
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.3 - 4% - 25L			
Série	Tempo de ensaio [min]	Valores Medidos	
		Gm	Rm
1	0	6,56	1,64
	15	5,18	1,50
	30	4,06	1,37
	45	2,90	1,17
	60	2,12	0,93
	75	1,27	0,58

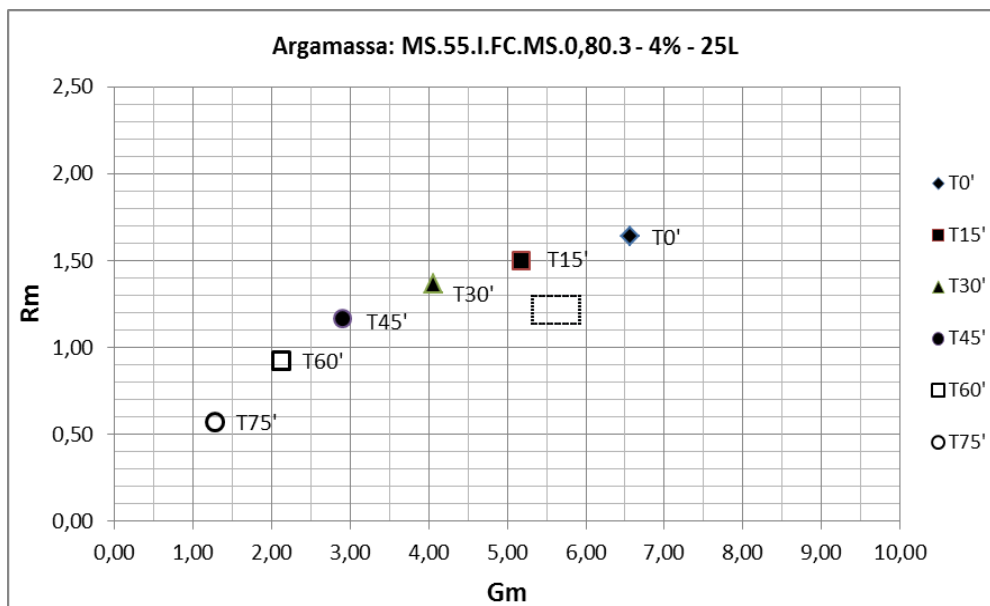


Figura 5.34 - Resultados dos ensaios reológicos em função do tempo decorrido após amassadura

Apesar da percentagem de microssilica adicionada não ser muito significativa quando comparada com a amassadura anterior (2% de microssilica) é possível, mesmo assim, através dos parâmetros reológicos notar um melhor comportamento ao longo do tempo. Nos gráficos das Figuras 5.35 e 5.36 apresenta-se a variação dos parâmetros reológicos (Gm e Rm),

expressos em termos de “taxa de redução”, em função do tempo decorrido após amassadura para esta argamassa e a sua comparação com a argamassa de referência.

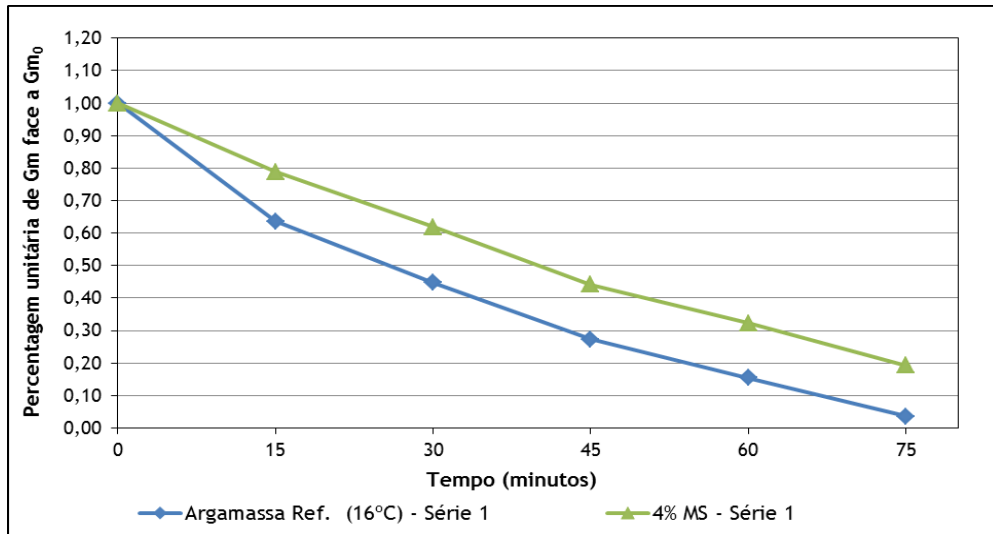


Figura 5.35- Argamassa de referência e Argamassa com 4% de microssilica vs Gm em função do tempo

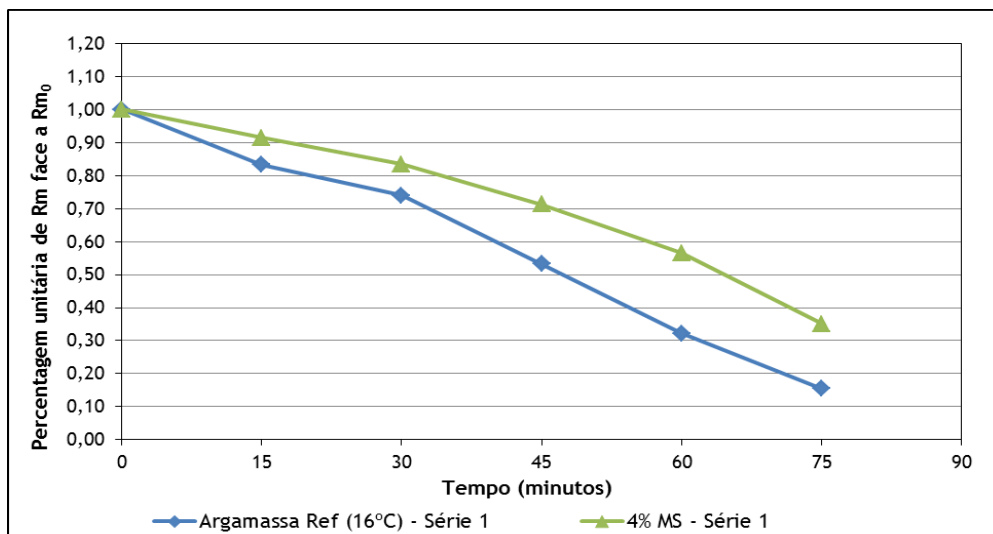


Figura 5.36 - Argamassa de referência e Argamassa com 4% de microssilica vs Rm em função do tempo

Uma das conclusões que parece evidenciar-se, é que, pequenas percentagens de microssilica proporcionam um significativo aumento no consumo de superplastificante por parte da mistura, proporcionando, em consequência, uma maior retenção da trabalhabilidade ao longo do tempo quando comparada com a mistura de referência.

5.7.3-Análise comparativa da *Série c*

No que respeita às amassaduras da *Série c*, quando comparadas com a argamassa de referência, é possível notar-se que o acréscimo de microssilica em ambos os casos (2% e 4%) proporcionou um aumento no consumo de superplastificante das misturas e uma consequente melhoria na sua capacidade de retenção da trabalhabilidade quando comparadas com a argamassa de referência. Esses resultados são evidenciados nos gráficos que se apresentam nas Figuras 5.37 e 5.38 e que comparam todas as misturas desta série.

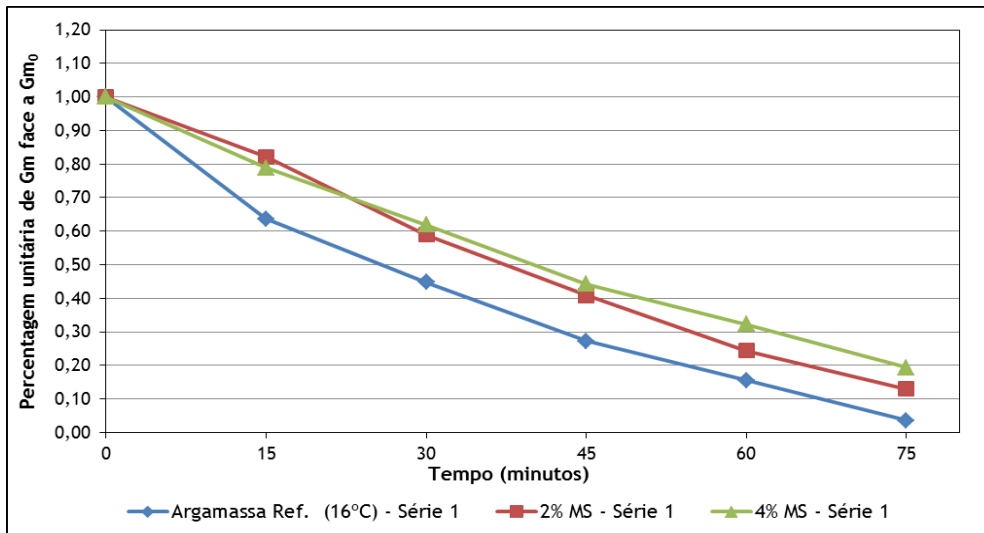


Figura 5.37 - Argamassa de referência e argamassas com microssilica vs Gm em função do tempo

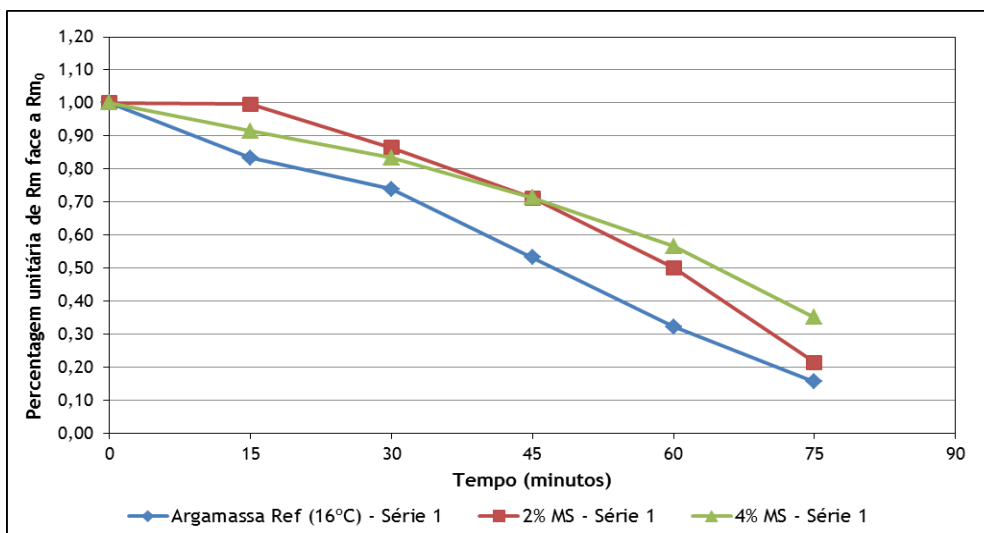


Figura 5.38 - Argamassa de referência e argamassas com microssilica vs Rm em função do tempo

Os primeiros 30 minutos decorridos após amassadura revelam um dado curioso, nomeadamente, verifica-se que para ambos os parâmetros (Gm e Rm) analisados em função do tempo, a mistura com 2% de microssilica consegue ter um melhor comportamento

relativamente à mistura com 4% de microssílica. Daí em diante, a argamassa com 4% de microssílica assume-se como sendo a que apresenta um melhor comportamento e consequentemente uma melhor retenção da trabalhabilidade.

Contudo, é de salientar que as dosagens de microssílica testadas (2% e 4%) são muito semelhantes entre si e praticamente se equivalem. Na prática, deveria ter sido testada uma argamassa com uma percentagem maior de substituição (por exemplo, 10% de microssílica) de modo a ser possível avaliar de forma mais ousada e precisa as verdadeiras capacidades que a microssílica pode acrescentar à mistura, melhorando assim significativamente a retenção trabalhabilidade desta, mesmo que esse efeito possa ser atribuído indirectamente ao aumento da dosagem de superplastificante.

5.8- Resistência à compressão das argamassas produzidas

Como descrito no Capítulo 4, para cada argamassa ensaiada foram produzidos provetes (40x40x160) para ensaiar à compressão de modo a obter a resistência de cada argamassa aos 7 e 28 dias de idade. Estes resultados são apresentados apenas como indicativos, já que se apresentam em número pouco significativo que permitam daí extrair conclusões relevantes. Importa referir que a ideia inicial subjacente seria a de avaliar o efeito que a recuperação da trabalhabilidade, exercida através da introdução de pequenas dosagens de água e de superplastificante decorrido já algum tempo após a amassadura, teria na resistência à compressão da argamassa e, em consequência, nos BAC com elas produzidos. Outra das opções iniciais seria a de avaliar a resistência à compressão após a amassadura e ao fim de 120 minutos, de forma a avaliar uma possível redução da resistência. Por questões operacionais, nomeadamente, o número de moldes disponível, apenas foi possível comparar a resistência dos provetes moldados após amassadura com aqueles moldados ao fim de 120 minutos.

Os Quadros 5.18 e 5.19 apresentam os valores médios da resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade obtidos para as argamassas estudadas. Para a *Série b* não se ensaiaram provetes, pelo simples facto que, as argamassas desta série são em tudo semelhantes à produzida na argamassa de referência.

Quadro 5.18 - Valores de carga de rotura e valor médio de resistência à compressão aos 7 dias

	Identificação da argamassa	Tempo de enchimento dos provetes (minutos)	Idade (dias)	Carga de rotura [KN]	Valor médio de resistência à compressão [MPa]
Argamassa de Referência	A.MS.55.I.FC.0,80.8-25L	0	7	71,6	44,17
				69,2	
				71,2	
	A.MS.55.I.FC.0,80.8-25L	120*		73,3	42,54
				62,0	
68,9					
Argamassas Série a)	A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L	0	7	41,8	26,00
				41,9	
				41,1	
	A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L	120*		40,1	25,00
				39,9	
40,0					
Argamassas Série c)	A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 2%	0	7	70,7	50,00
				84,6	
				84,7	
	A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 4%	0		69,4	45,75
				65,6	
84,6					

*Corresponde ao fim da Série 2 (após adição de 20g de Sp)

Quadro 5.19 - Valores de carga de rotura e valor médio de resistência à compressão aos 28 dias

	Identificação da argamassa	Tempo de enchimento dos provetes	Idade (dias)	Carga de rotura [KN]	Valor médio de resistência à compressão [MPa]
Argamassa de Referência	A.MS.55.I.FC.0,80.8-25L	0	28	87,3	54,54
				86,7	
				87,8	
	A.MS.55.I.FC.0,80.8-25L	120*		81,2	52,35
				84,6	
85,5					
Argamassas Série a)	A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L	0	28	58,3	35,02
				54,5	
				55,3	
	A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L	120*		53,6	32,40
				47,9	
54,0					
Argamassas Série c)	A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 2%	0	28	99,5	61,81
				98,6	
				98,6	
	A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 4%	0		94,1	61,94
				101,6	
101,6					

*Corresponde ao fim da Série 2 (após adição de 20g de Sp)

Observando os resultados apresentados nos Quadros 5.18 e 5.19, é possível verificar que, quer na argamassa de referência, quer na argamassa da *Série a*, os valores da resistência à compressão dos provetes moldados aos 120 minutos foram ligeiramente inferiores àqueles moldados imediatamente após amassadura. Importa referir que em ambos os casos a reologia das misturas havia sido recuperada com a adição de uma pequena quantidade de superplastificante aos 75 minutos e que, aquando da medição aos 120 minutos, as misturas apresentavam propriedades reológicas mais desfavoráveis face às condições registadas após amassadura.

As resistências à compressão da argamassa de referência e da *Série a* não são comparáveis entre si, uma vez que incorporam ligantes diferentes. Importa apenas referir que ambas apresentaram os valores de resistência à compressão aos 28 dias de idade previstos na metodologia de cálculo adoptada em função da razão W/C.

A argamassa da *Série c* difere da argamassa de referência pela incorporação de pequenas dosagens de microssílica em substituição parcial do fíler calcário (2% e 4%). Neste caso, o efeito pozolânico da microssílica fez-se notar pela obtenção de resistências superiores face à argamassa de referência. Esse efeito foi muito significativo aos 28 dias de idade, permitindo confirmar os efeitos benéficos das adições de microssílica no incremento da resistência à compressão. Outros efeitos, como a melhoria da durabilidade e adensamento da matriz também lhe são reconhecidos pela literatura científica. Importa ainda referir que aos 28 dias de idade não se detectaram diferenças significativas entre as resistências à compressão obtidas com 2% ou 4% de percentagem de substituição do fíler calcário por microssílica.

5.9- Conclusões

Em jeito de conclusão, elaborou-se graficamente uma comparação “geral”, focando todas as argamassas estudadas experimentalmente nesta dissertação. O gráfico da Figura 5.39 apresenta a área de espalhamento relativa em termos de “taxa de redução” obtida em função do tempo, para todas as argamassas.

De uma forma simples, é possível perceber através da observação do gráfico da Figura 5.39 que, em termos gerais, ao longo dos 75 minutos ensaiados, a argamassa que apresenta um melhor comportamento relativamente ao espalhamento verificado é a argamassa que incorpora 4% de microssílica. Por sua vez, a argamassa com pior desempenho ao nível da área de espalhamento relativa é a mistura produzida à temperatura de 22°C, sendo de notar que nesta mistura apenas foi possível efectuar os ensaios de espalhamento até aos 45 minutos, o que indicia à priori uma fraca retenção da trabalhabilidade ao longo do tempo.

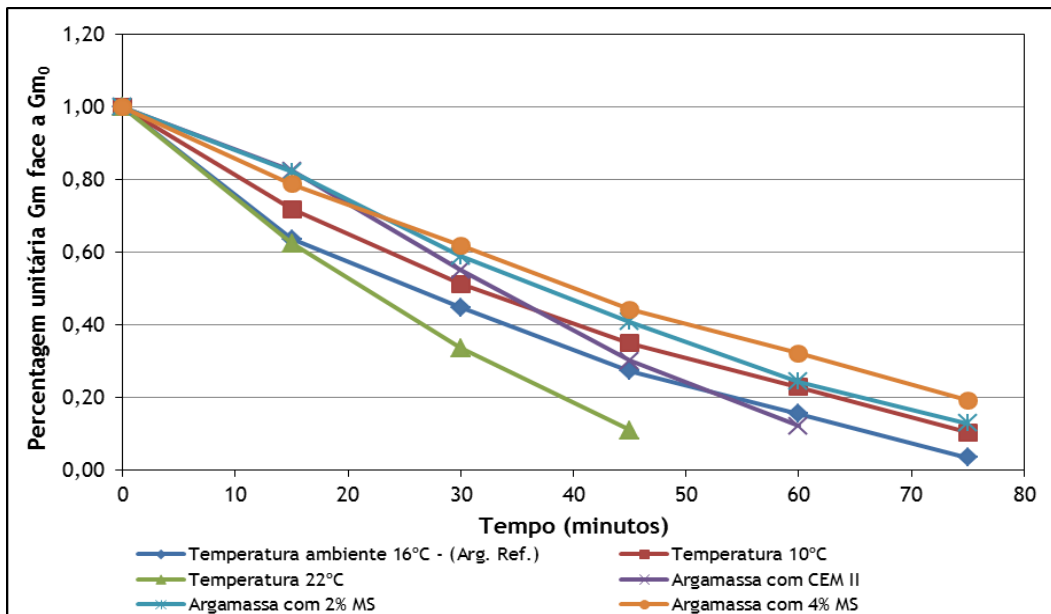


Figura 5.39 - Todas as argamassas ensaiadas vs Gm em função do tempo

As diversas misturas, foram também comparadas pela velocidade relativa de escoamento (R_m) verificada individualmente em ensaios experimentais, como demonstra o gráfico da Figura 5.40.

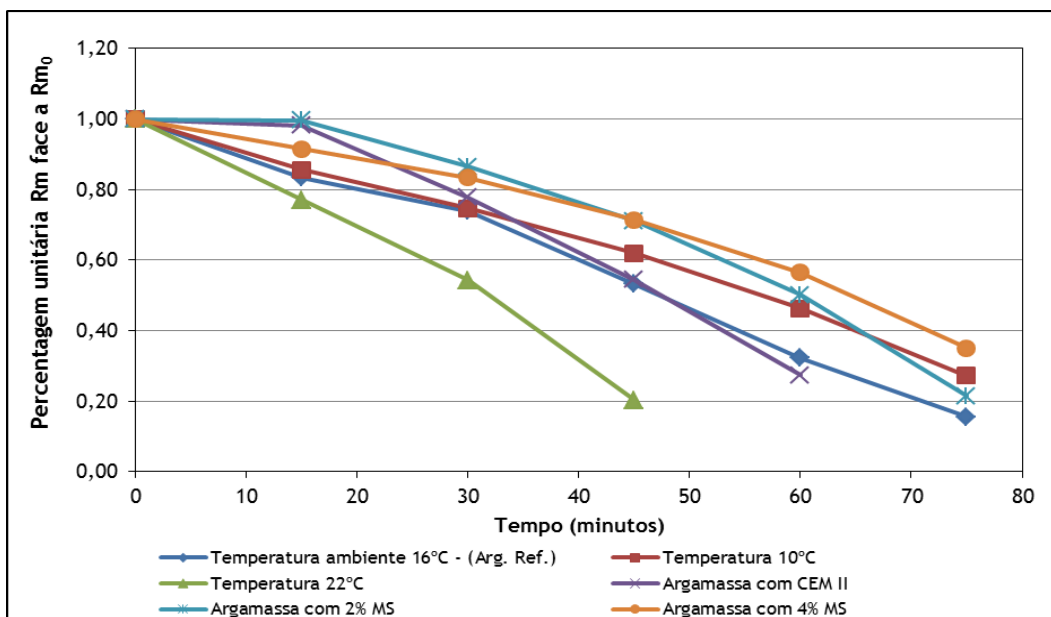


Figura 5.40 - Todas as argamassas ensaiadas vs Rm em função do tempo

Quanto à velocidade relativa de escoamento, comparando todas as misturas em termos de “taxa de redução”, é perceptível que a mistura com 2% de microsilica consegue manter uma melhor velocidade de escoamento até aos 60 minutos, no entanto, em termos gerais, a mistura que melhor comportamento apresenta em termos de velocidade relativa de escoamento é a argamassa com 4% de microsilica.

Resumindo, a argamassa que pode apresentar uma melhor retenção da trabalhabilidade ao longo do tempo é a mistura com 4% de microssilica, por seu lado, a que verifica um pior comportamento é a mistura realizada à temperatura de 22°C.

A respeito dos ensaios à compressão realizados aos diferentes provetes, é possível através dos resultados obtidos, constatar que, a resistência verificada nos provetes cuja recolha de argamassa ocorreu aos 120 minutos é ligeiramente inferior quando comparada com a dos provetes cuja argamassa foi recolhida imediatamente após amassadura. No entanto, como foi referido anteriormente, as condições reológicas não são exactamente iguais, visto que, aos 75 minutos se adicionou à mistura uma pequena quantidade de superplastificante com o objectivo de recuperar alguma trabalhabilidade. Era de esperar que este procedimento influencia-se ligeiramente a resistência dos provetes, quando ensaiados à compressão.

Na figura 5.41 e 5.42, é possível vislumbrar o aspecto final dos provetes depois de realizado o ensaio à compressão.

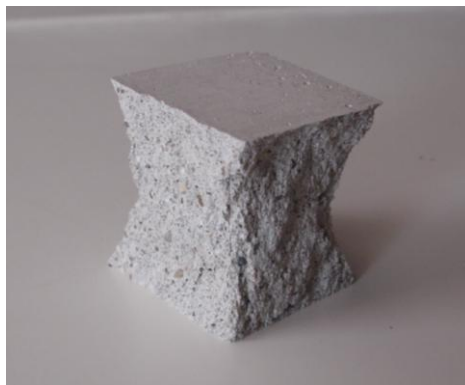


Figura 5.41 - Aspecto do provete após ensaio à compressão



Figura 5.42 - Aspecto do provete após ensaio à compressão

Capítulo 6- Conclusões e propostas para trabalhos futuros

6.1- Introdução

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais de todo o trabalho, reflexo de todos os resultados obtidos experimentalmente. As conclusões serão apresentadas focando o objetivo primordial desta dissertação, isto é, a “Análise da retenção da trabalhabilidade da fase argamassa dos betões auto-compactáveis”. Por fim, serão apresentadas algumas propostas consideradas válidas, para que, futuramente se realizem investigações no sentido de aprofundar a vasta área que engloba este tema.

6.2- Conclusões

O objectivo inicial delineado para a presente dissertação consistiu em avaliar a influência de um conjunto restrito de parâmetros na capacidade de retenção da trabalhabilidade do betão auto-compactável. É importante notar que todo o estudo experimental realizado se processou com base nas argamassas, pois, como anteriormente focado, a fase de argamassa é a preponderante para a mistura de um betão auto-compactável.

Seguindo o método proposto por Nepomuceno [18], para a elaboração de argamassas para betão auto-compactável, realizou-se uma mistura denominada de argamassa de referência, com o intuito de servir de modelo comparativo a todos os parâmetros posteriormente testados. Enquadrando esta argamassa no tema desta dissertação obtiveram-se as seguintes conclusões:

a) Depois de exaustivamente avaliada esta argamassa, confirma-se a hipótese inicial de que a perda de trabalhabilidade se deve principalmente à perda do efeito dispersante do superplastificante, na medida em que a razão Gm/Rm , que está directamente relacionada com a dosagem de superplastificante, decresce significativamente ao longo do tempo;

b) Após a amassadura, a perda de água na mistura também reflecte alguma importância na retenção da trabalhabilidade, embora, como é gráficamente visível no Capítulo anterior, a razão $Rm/(Gm^{0.4})$ que está relacionada com Vw/Vp mostre um patamar quase constante, ou seja, não assuma um papel fulcral;

c) Tais resultados poderão ser muito úteis, pois permitem avaliar de uma forma simples, através dos parâmetros reológicos G_m e R_m ensaiados experimentalmente, a retenção da trabalhabilidade através da razão $S_p/p\%$ e V_w/V_p em função do tempo.

Depois de realizada uma conveniente avaliação à argamassa de referência, prosseguiu-se a investigação com o objectivo de avaliar a influência de alguns factores previamente referenciados.

Começando por averiguar a influência que o tipo de cimento poderá proporcionar à mistura, realizou-se uma amassadura com cimento portland de calcário CEM II/B-L32,5N, uma opção diferente da utilizada na argamassa de referência. A análise ocorreu com base no mesmo procedimento experimental, proporcionando as seguintes conclusões:

a) Para a mistura testada na *Séria a*, o CEM II/B-L32,5N proporciona uma maior capacidade de retenção da trabalhabilidade à argamassa nos instantes iniciais após a amassadura. Tal facto aparenta estar directamente relacionado com as características do cimento, uma vez que se utilizou um cimento com baixo calor de hidratação que proporciona uma melhor trabalhabilidade;

b) A escolha do tipo de cimento pode ter um contributo significativo na retenção da trabalhabilidade das misturas. No entanto, no presente trabalho só foram avaliados dois cimentos, um de endurecimento rápido e outro de endurecimento lento, pelo que as conclusões devem ser observadas nesse contexto. De qualquer forma, os resultados parecem indicar que o tipo de cimento não será o factor com maior preponderância no que respeita à retenção de trabalhabilidade na argamassa.

Outro dos parâmetros analisados foi a temperatura de amassadura. Mais concretamente, analisou-se a influência da temperatura na capacidade de retenção da trabalhabilidade, ou seja, na manutenção das propriedades reológicas (G_m e R_m) da argamassa, quando avaliada ao longo do tempo. Os resultados apresentados levam a crer que:

a) A argamassa que registou uma temperatura de amassadura mais baixa, neste caso concreto de estudo a 10°C , foi aquela que proporcionou uma maior capacidade de retenção da trabalhabilidade ao longo do tempo decorrido após essa amassadura.

b) Quando comparadas as argamassas com temperaturas de amassadura de 10°C , 16°C e 22°C , é bem visível nos resultados obtidos que a temperatura influencia de forma directa o comportamento da argamassa, ou seja, a capacidade de retenção da trabalhabilidade diminui à medida que se aumenta a temperatura de amassadura. Tal facto poderá estar relacionado com a hidratação do cimento nas diferentes condições de amassadura. Conclui-se então, que a temperatura de amassadura, é um factor de grande importância a ter em consideração, na medida que influencia consideravelmente a trabalhabilidade da argamassa.

O último parâmetro analisado foi a influência da dosagem de superplastificante. Para avaliar este parâmetro realizou-se uma mistura ternária, isto é, adicionou-se à argamassa de referência pequenas percentagens de microssílica com o objectivo de aumentar a necessidade de superplastificante à mistura. Os resultados obtidos, permitiram concluir o seguinte:

a) Ambas as argamassas que incorporaram pequenas quantidades de microssílica (2% e 4%), revelaram maior capacidade de retenção da trabalhabilidade que a argamassa de referência, sem microssílica. Ainda que a adição de microssílica tenha potenciado o efeito referido, ele deverá ser atribuído ao efeito do aumento da dosagem de superplastificante.

b) Nos primeiros 30 minutos após a amassadura, a mistura com menos percentagem de microssílica apresenta um melhor comportamento.

c) Para uma conclusão mais precisa, deveria ter-se efectuado uma análise com uma percentagem de substituição maior de microssílica, de modo a testar a saturação da mistura com superplastificante, analisando em seguida, se o seu efeito apenas se verifica até um determinado patamar, mantendo-se constante daí em diante.

Em suma, considera-se que os dados obtidos experimentalmente foram muito proveitosos e conclusivos no que respeita à análise da retenção de trabalhabilidade em argamassas. Da argamassa de referência estudada, a conclusão mais importante e válida a retirar é que o superplastificante é o componente que mais influência a retenção da trabalhabilidade nas argamassas, e conseqüentemente dos betões auto-compactáveis. Relativamente aos outros parâmetros considerados, todos eles revelaram influenciar a trabalhabilidade das argamassas estudadas, embora uns mais que outros sejam preponderantes no que respeita a esta análise.

6.3- Recomendações para trabalhos futuros

É sabido que a área na qual se enquadra o tema desta dissertação tem sofrido um enorme desenvolvimento nas últimas décadas no que respeita à investigação e exploração da mesma. O betão auto-compactável, com todas as suas características, representa uma solução muito válida em diversas situações, porém, hoje em dia em Portugal, a sua utilização está mais presente em obras de grande envergadura. O seu elevado custo e minucioso processo de produção, quando comparado com o dito betão corrente, torna o BAC pouco rentável nos dias que correm.

A sensação que fica, é de que, o presente trabalho, acrescentou algo mais em termos de resultados, na investigação desta área em concreto. Porém, será necessário ir sempre mais além nas investigações, só assim será possível tornar mais rentável a escolha do BAC na área da construção.

Com base nos resultados obtidos para a argamassa de referência, foi possível considerar que a dosagem de superplastificante é o parâmetro que mais influencia a mistura. Contudo, estas conclusões apenas se podem considerar válidas para as condições testadas nesta dissertação.

Sugere-se que em investigações futuras, utilizando o mesmo método que na argamassa de referência, se analisem diferentes misturas de modo a generalizar a importância do superplastificante na retenção de trabalhabilidade das argamassas.

Outro aspecto que não ficou totalmente esclarecido perante os resultados obtidos nesta dissertação, foi a real importância da adição de microssílica à argamassa. Em futuras investigações, deverão ser testadas percentagens maiores, de modo a ser possível avaliar a saturação da argamassa por parte do superplastificante e ser perceptível até que ponto o superplastificante é fundamental para manter a trabalhabilidade da argamassa.

Outros estudos mais precisos relativamente à capacidade de retenção das propriedades reológicas das argamassas após amassadura devem ser realizados com o auxílio de reómetros ou viscosímetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BONEN, D. and SARKAR, S.L., “The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition and parameters affecting flow loss” *Cem. And Conc. Res.* 25, 7, 1995, 1423-1434.
- [2] DAMONE, P.L., CHAI, H-W. and JIN, J., “Optimum mix proportioning of self-compacting concrete” in “Creating with Concrete”, Proceedings of International Congress, University of Dundee, September 1999, (Thomas Telford, London, 1999).
- [3] DIAS, Nídia C.; “Betão auto-compactável branco”, Tese de mestrado, Universidade de Coimbra-Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, Novembro de 2002.
- [4] Documents Scientifiques et Techniques - Betons Auto-Plaçants: Recommandations Provisoires, Association Française de Génie Civil, Juillet 2000.
- [5] DOMONE, P. - Mix Design (Background Document), in «Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC», RILEM Publications S.A.R.L., ISBN: 2-912143-23-3, 2000, p. 49-65.
- [6] DOMONE, P.L.J.; JIN, J. - Properties of Mortar for Self-compacting Concrete, in «Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete», Sweden, ISBN: 2-912143-09-8, Sept. 1999, p. 109-120.
- [7] Especificação LNEC E245-1971 - Inertes para Argamassas e Betões: Análise granulométrica.
- [8] Especificação LNEC E248-1971 - Inertes para Argamassas e Betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Areias.
- [9] Especificação LNEC E255-1971 - Betões: Preparação de Provetes para Ensaios de Compressão e de Flexão.
- [10] Especificação LNEC E372-1993 - Água de Amassadura para Betões: Características e Verificação da Conformidade.
- [11] Especificação LNEC E374-1993 - Adjuvantes para Argamassas e Betões: Características e Verificação da Conformidade.
- [12] Especificação LNEC E64-1960 - Cimento Portland: Determinação da massa específica.
- [13] European Project Group; “The European Guidelines for Self Compacting Concrete: Specification, Production and Use”, May, 2005.
- [14] FUJIWARA, H., NAGATAKI, S., OTSUKI, N. and ENDO, E., “Study on reducing unit poeder content of high-fluidity concrete by controlling powder particle size distribution” *Conc. Lib. Of Japan Soc. of Civ. Eng.*, 28, December 1996, 117-128.
- [15] HIGUCHI, M. - State-of-the-art Report on Manufacturing of Self-Compacting Concrete, in «International Workshop on Self-Compacting Concrete», August 1998, p. 360-367.
- [16] KHAYAT, K.; TANGTERMSIRIKUL, S. - Fresh Concrete Properties (Background Document), in «Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC», RILEM Publications S.A.R.L., ISBN: 2-912143-23-3, 2000, p. 17-22.

- [17] NAWA, T, IZUMI, T and EDAMATSU, Y., “State-of-the-art report on materials and design of self-compacting concrete” Proc. Og Int. Workshop on Self-compacting Concrete, ed Ozawa K. and Ouchi, K., Kochi University of Technology, Japan, August 1998, 160-190.
- [18] NEPOMUCENO, Miguel C.S. - Betão auto-compactável: Metodologia de composição, «Dissertação de Doutoramento apresentada na Universidade da Beira Interior (UBI)», Covilhã, 2005
- [19] Norma Portuguesa Definitiva - NP 581 - Inertes para Argamassas e Betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Britas e Godos. IGPAL, Lisboa, 1969.
- [20] Norma Portuguesa Definitiva - NP 581 - Inertes para Argamassas e Betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Britas e Godos. IGPAL, Lisboa, 1969.
- [21] Norma Portuguesa Definitiva - NP 954 - Inertes para Argamassas e Betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Areias. IGPAL, Lisboa, 1973.
- [22] NUNES, Sandra C. B.; “Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades”; Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Setembro de 2001.
- [23] OKAMURA, H.; OUCHI, M. - Self-Compacting Concrete: Development, Present Use and Future (keynote Lectures), in «Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete», Sweden, ISBN: 2-912143-09-8, Sept. 1999, p. 3-14.
- [24] OKAMURA, H; OUCHI, M; “Self- Compacting Concrete”, Journal of Advanced Concrete technology, Vol. 1, No. 1, 5-15, April 2003.
- [25] OUCHI, M. - State-of-the-art Report: Self-Compactability Evaluation for Mix-Proportioning and Inspection, in «International Workshop on Self-Compacting Concrete», August 1998, p. 111-120.
- [26] OUCHI, M.; HIBINO, M.; OZAWA, K.; OKAMURA, H. - A Rational Mix-Design Method for Mortar in Self-Compacting Concrete, in «Proceedings of the Sixth East-Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction», Taipei, Taiwan, 1998, p. 1307-1312
- [27] PETERSSON, O.; BILLBERG, P; BUI, V. K. - A model for Self-Compacting Concrete, in «Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete», Paisley, June 1996, Ed. Bartos PJM, Marrs DL, and Cleland DJ, E&FN Spon; London, p 484-492.
- [28] PUNKKI, J. GOLASZEWSKI, J. and GJORV, OE., “Workability loss of high-strength concrete” ACI Materials Journal, 93, 5, September-October 1996, 427-431.
- [29] SKARENDAHL, A. - Self-Compacting Concrete in Sweden - Research and Application, in «International Workshop on Self-Compacting Concrete», August 1998, p. 60-71.
- [30] SKARENDAHL, A; PETERSSON, Ö; “Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC”, RILEM Publications S.A.R.L, 2000.
- [31] TAKADA, K. - Placement (Background Document), in «Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC», RILEM Publications S.A.R.L., ISBN: 2-912143-23-3, 2000, p. 79-87.
- [32] TAKADA, K.; PELOVA, G.; WALRAVEN, J. - Influence of Mixing Efficiency on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete, in «International Workshop on Self-Compacting Concrete», August 1998, p. 368-383.

ANEXOS

ANEXO A.1
ARGAMASSA DE REFERÊNCIA

Quadro A.1 - Parâmetros reológicos para acerto da argamassa de referência

ARGAMASSA: A.MS.55.I.FC.0,80								
Mistura	Parâmetros da mistura			Leituras			Reologia	
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [seg.]	Gm	Rm
A.MS.55.I.FC.0,80.1	0,80	0,70	0,35	313	315	5,39	8,86	1,86
A.MS.55.I.FC.0,80.2	0,80	0,68	0,35	294	293	7,38	7,61	1,36
A.MS.55.I.FC.0,80.3	0,80	0,67	0,33	279	275	8,85	6,67	1,13
A.MS.55.I.FC.0,80.4	0,80	0,68	0,31	214	215	11,38	3,60	0,88
A.MS.55.I.FC.0,80.5	0,80	0,67	0,34	225	223	9,81	4,02	1,02
A.MS.55.I.FC.0,80.6	0,80	0,67	0,35	247	248	10,50	5,13	0,95
A.MS.55.I.FC.0,80.7	0,80	0,69	0,34	235	233	10,40	4,48	0,96
A.MS.55.I.FC.0,80.8	0,80	0,70	0,34	262	260	7,66	5,81	1,31

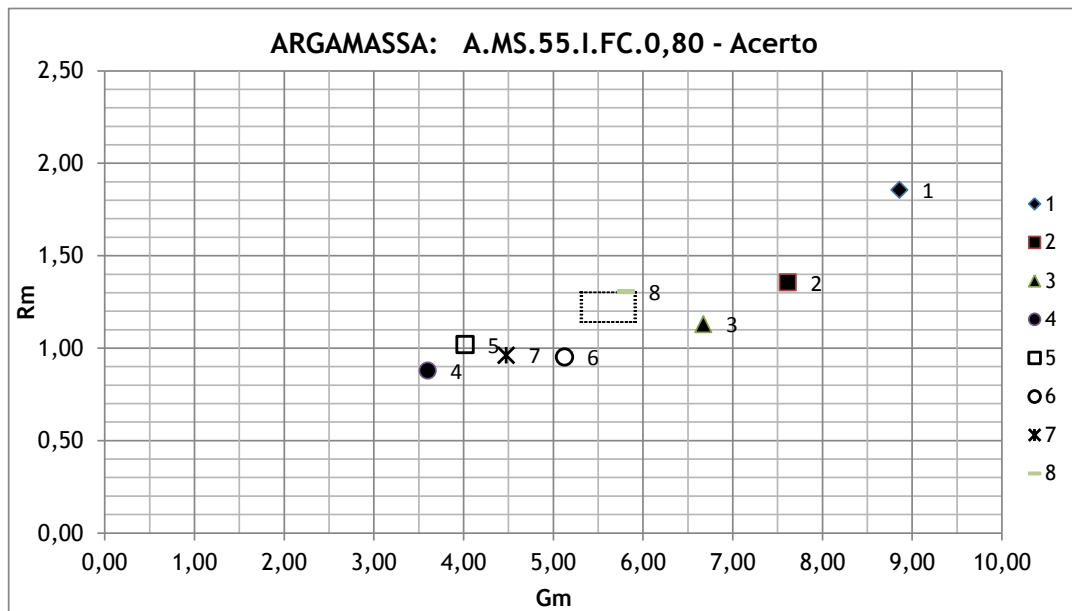


Figura A.1 - Tentativas para acerto da argamassa de referência

Quadro A.2 - Composição da argamassa de referência (amassadura de 25 litros)

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS										
Identificação da argamassa			Identificação da mistura de finos			Data				
A.MS.55.I.FC.0,80.8-25L			40C1+60FC			26-01-2011				
Parâmetros da composição			Composição da mistura de finos			Abertura da malha (mm)	Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%	fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg		
0,80	0,70	0,34	0,40	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00		
			Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³			9,520	100,00	100,00		100,00
						4,760	100,00	99,88		99,94
						2,380	99,96	94,77		97,37
						1,190	99,62	71,59		85,61
						0,590	73,48	28,00		50,74
						0,297	13,36	1,96		7,66
						0,149	0,98	0,34		0,66
						0,074	0,12	0,14		0,13
						Resíduo	0,00	0,00		0,00
						Módulos de finura				
							2,126	3,035	7,000	2,580
						$\bar{\rho} = 2888,00 \text{ kg/m}^3$ $V_{sp}/V_p = 0,009352 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_p = 0,337912 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_w = 0,236538 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_{sp} = 0,00316 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_s = 0,42239 \text{ m}^3/\text{m}^3$				
			Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³							
			Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³							
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros					Quantidades para um volume de: 25,00 litros					
C1=	424,4 kg				C1=	10610,4 g				
C2=	0,0 kg		Massa total. em kg		C2=	0,0 g		Massa total. em g		
CV=	0,0 kg		2320,3		CV=	0,0 g		58007,4		
MS=	0,0 kg		Razão água/(mat. cimentícios)		MS=	0,0 g		Razão água/(mat. cimentícios)		
FC=	551,5 kg		0,557		FC=	13786,8 g		0,557		
FG=	0,0 kg		Razão água/cimento		FG=	0,0 g		Razão água/cimento		
W=	236,5 litros		0,557		W=	5913,5 ml		0,557		
Sp=	3,16 litros		Razão água/finos		Sp=	79,00 ml		Razão água/finos		
S1=	549,1 kg		0,242		S1=	13727,7 g		0,242		
S2=	555,4 kg				S2=	13886,1 g				
S3=	0,0 kg				S2=	0,0 g				

Quadro A.3 - Resistência à compressão da argamassa de referência recolhida após amassadura de 25Lt.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS									
(PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv.	Valor médio	Desvio padrão	Coef. variação
						[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
A.MS.55.I.FC.0,80.8-25L aos 0'	1	26-01-2011	02-02-2011	7	71,6	44,8	44,17	0,80	1,8
	2				69,2	43,3			
	3				71,2	44,5			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm⁻². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS									
(PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv.	Valor médio	Desvio padrão	Coef. variação
						[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
A.MS.55.I.FC.0,80.8-25L aos 0'	4	26-01-2011	23-02-2011	28	87,3	54,6	54,54	0,34	0,6
	5				86,7	54,2			
	6				87,8	54,9			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm⁻². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A.4 - Massa volúmica da argamassa de referência recolhida após amassadura de 25Lt.

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS									
(PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv.	Valor médio	Desvio padrão	Coef. variação
						[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
A.MS.55.I.FC.0,80.8-25L aos 0'	1 e 2	26-01-2011	02-02-2011	7	646,9	2527,0	2523,0	52,5	2,1
	3 e 4				658,8	2573,4			
	5 e 6	26-01-2011	23-02-2011	28	632,0	2468,8			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm⁻². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A.5 - Resistência à compressão da argamassa de referência recolhida aos 120 minutos

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS									
(PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.1.FC.0,80.8-25L aos 120'	1	26-01-2011	02-02-2011	7	73,3	45,8	42,54	3,56	8,4
	2				62,0	38,8			
	3				68,9	43,1			
Notas:									
1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %									
2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca									
3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ² . s ⁻¹)									
4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS									
(PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.1.FC.0,80.8-25L aos 120'	4	26-01-2011	23-02-2011	28	81,2	50,8	52,35	1,42	2,7
	5				84,6	52,9			
	6				85,5	53,4			
Notas:									
1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %									
2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca									
3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ² . s ⁻¹)									
4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

Quadro A.6 - Massa volúmica da argamassa de referência recolhida aos 120 minutos

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS									
(PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.MS.55.1.FC.0,80.8-25L aos 120'	1 e 2	26-01-2011	02-02-2011	7	652,6	2549,2	2542,8	9,4	0,4
	3 e 4				652,1	2547,3			
	5 e 6	26-01-2011	23-02-2011	28	648,2	2532,0			
Notas:									
1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %									
2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca									
3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ² . s ⁻¹)									
4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

ANEXO A.2
ARGAMASSA COM CIMENTO TIPO II

Quadro A.7 - Parâmetros reológicos para acerto da argamassa com cimento tipo II

ARGAMASSA: A.MS.55.II.FC.0,80								
Mistura	Parâmetros da mistura			Leituras			Reologia	
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [seg.]	Gm	Rm
A.MS.55.II.FC.0,80.1	0,80	0,67	0,40	184	185	11,41	2,40	0,88
A.MS.55.II.FC.0,80.2	0,80	0,69	0,45	246	246	8,00	5,05	1,25
A.MS.55.II.FC.0,80.3	0,80	0,69	0,46	269	267	7,79	6,18	1,28
A.MS.55.II.FC.0,80.4	0,80	0,68	0,46	225	226	9,39	4,09	1,06
A.MS.55.II.FC.0,80.5	0,80	0,68	0,47	233	234	8,37	4,45	1,19
A.MS.55.II.FC.0,80.6	0,80	0,69	0,46	287	281	7,38	7,07	1,36
A.MS.55.II.FC.0,80.7	0,80	0,69	0,45	253	251	7,92	5,35	1,26

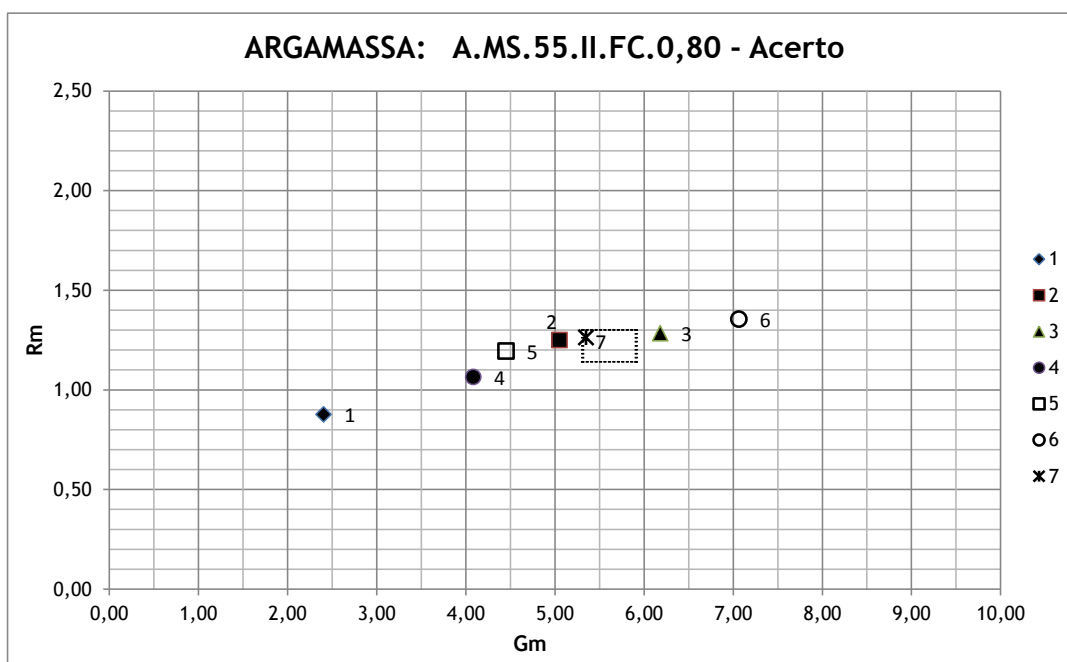


Figura A.2 - Tentativas para acerto da argamassa com cimento tipo II

Quadro A.8 - Composição da argamassa com cimento tipo II (amassadura de 25 litros)

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS											
Identificação da argamassa			Identificação da mistura de finos				Data				
A.MS.55.II.FC.0,80.7 - 25L			40C2+60FC				31-01-2011				
Parâmetros da composição							Abertura da malha (mm)	Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%						0,50	0,50		
0,80	0,69	0,455					Percentagem de passados				
							9,520	100,00	100,00		100,00
							4,760	100,00	99,88		99,94
							2,380	99,96	94,77		97,37
							1,190	99,62	71,59		85,61
							0,590	73,48	28,00		50,74
							0,297	13,36	1,96		7,66
							0,149	0,98	0,34		0,66
							0,074	0,12	0,14		0,13
							Resíduo	0,00	0,00		0,00
							Módulos de finura				
								2,126	3,035	7,000	2,580
Composição da mistura de finos											
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg						
0,00	0,40	0,00	0,00	0,60	0,00						
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³											
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg						
3140	3040	2380	2170	2720	2650						
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³											
δs1	δs2	δs3	---	---	---						
2600	2630										
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³											
δsp	---	---	---	---	---						
1050											
						δp= 2848,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,012341 m ³ /m ³ Vp= 0,338714 m ³ /m ³ Vw= 0,233713 m ³ /m ³ Vsp= 0,00418 m ³ /m ³ Vs= 0,423393 m ³ /m ³					
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros						Quantidades para um volume de: 25,00 litros					
C1=	0,0 kg					C1=	0,0 g				
C2=	411,9 kg	<u>Massa total, em kg</u>				C2=	10296,9 g	<u>Massa total, em g</u>			
CV=	0,0 kg	2309,9				CV=	0,0 g	57748,3			
MS=	0,0 kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>				MS=	0,0 g	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>			
FC=	552,8 kg	0,567				FC=	13819,5 g	0,567			
FG=	0,0 kg	<u>Razão água/cimento</u>				FG=	0,0 g	<u>Razão água/cimento</u>			
W=	233,7 litros	0,567				W=	5842,8 ml	0,567			
Sp=	4,18 litros	<u>Razão água/finos</u>				Sp=	104,50 ml	<u>Razão água/finos</u>			
S1=	550,4 kg	0,242				S1=	13760,3 g	0,242			
S2=	556,8 kg					S2=	13919,0 g				
S3=	0,0 kg					S2=	0,0 g				

Quadro A.9 - Resistência à compressão da argamassa com cimento tipo II, recolhida após amassadura de 25Lt.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L aos 0'	1	31-01-2011	07-02-2011	7	41,8	26,1	26,00	0,27	1,0
	2				41,9	26,2			
	3				41,1	25,7			
Notas: 1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 % 2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca 3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹) 4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L aos 0'	4	31-01-2011	28-02-2011	28	58,3	36,4	35,02	1,25	3,6
	5				54,5	34,1			
	6				55,3	34,6			
Notas: 1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 % 2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca 3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹) 4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

Quadro A.10 - Massa volúmica da argamassa com cimento tipo II após amassadura de 25Lt.

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L aos 0'	1 e 2	31-01-2011	07-02-2011	7	651,3	2544,1	2530,7	11,7	0,5
	3 e 4				645,8	2522,7			
	5 e 6	31-01-2011	28-02-2011	28	646,5	2525,4			
Notas: 1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 % 2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca 3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹) 4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

Quadro A.11 - Resistência à compressão da argamassa com cimento tipo II recolhida aos 120 minutos

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L aos 120'	1	31-01-2011	07-02-2011	7	40,1	25,1	25,00	0,06	0,3
	2				39,9	24,9			
	3				40,0	25,0			
Notas: 1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 % 2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca 3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹) 4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L aos 120'	4	31-01-2011	28-02-2011	28	53,6	33,5	32,40	2,13	6,6
	5				47,9	29,9			
	6				54,0	33,8			
Notas: 1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 % 2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca 3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹) 4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

Quadro A.12 - Massa volúmica da argamassa com cimento tipo II recolhida aos 120 minutos

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.MS.55.II.FC.0,80.7-25L aos 120'	1 e 2	31-01-2011	07-02-2011	7	637,9	2491,8	2486,1	9,3	0,4
	3 e 4				633,7	2475,4			
	5 e 6	31-01-2011	28-02-2011	28	637,7	2491,0			
Notas: 1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 % 2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca 3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹) 4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

ANEXO A.3
ARGAMASSA COM 2% DE MICROSSÍLICA

Quadro A.13 - Parâmetros reológicos para acerto da argamassa com 2% microsilica

ARGAMASSA: A.MS.55.I.FC.MS.0,80								
Mistura	Parâmetros da mistura			Leituras			Reologia	
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [seg.]	Gm	Rm
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.1	0,80	0,67	0,70	361	358	5,74	11,92	1,74
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.2	0,80	0,65	0,69	335	336	6,42	10,26	1,56
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.3	0,80	0,62	0,68	300	302	8,89	8,06	1,12
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.4	0,80	0,62	0,66	296	297	8,02	7,79	1,25
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.5	0,80	0,61	0,65	282	284	8,79	7,01	1,14
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.6	0,80	0,61	0,64	285	286	8,81	7,15	1,14
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.7	0,80	0,60	0,61	269	268	10,25	6,21	0,98
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8	0,80	0,64	0,50	255	256	8,56	5,53	1,17

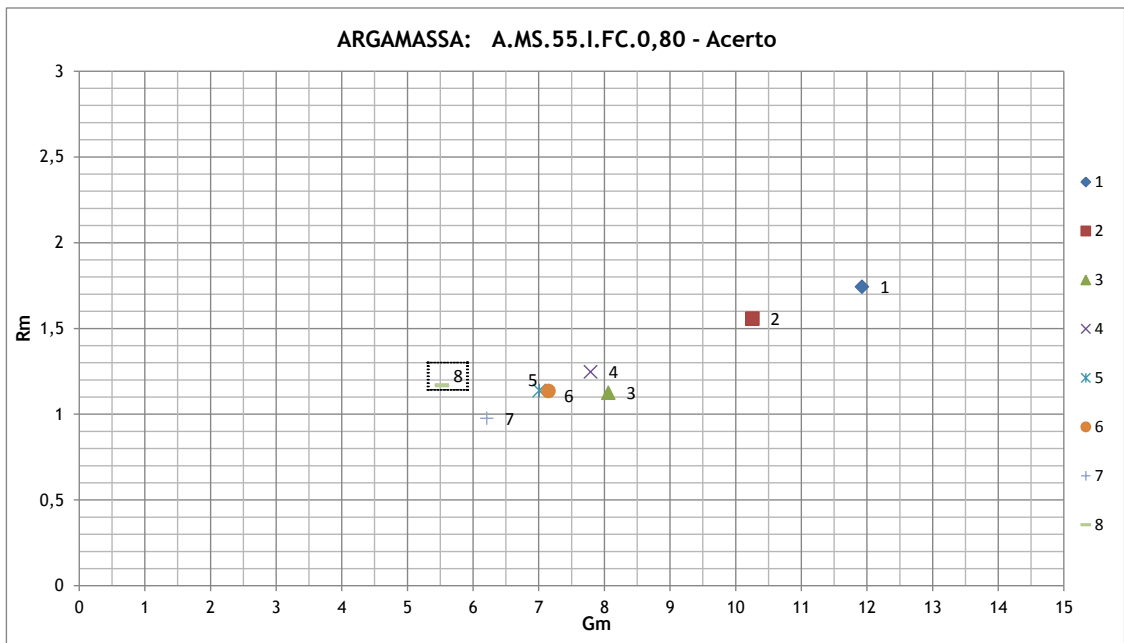


Figura A.3 - Tentativas para acerto da argamassa com 2% de microsilica

Quadro A.14 - Composição da argamassa com 2% de microsilica (amassadura de 25 litros)

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS										
Identificação da argamassa			Identificação da mistura de finos			Data				
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8-2%-25L			40C1+58FC+2MS			22-02-2011				
Parâmetros da composição						Abertura da malha (mm)	Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%				Percentagem de passados				
0,80	0,64	0,50				9,520	100,00	100,00		100,00
Composição da mistura de finos						4,760	100,00	99,88		99,94
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg	2,380	99,96	94,77		97,37
0,40	0,00	0,00	0,02	0,58	0,00	1,190	99,62	71,59		85,61
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³						0,590	73,48	28,00		50,74
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg	0,297	13,36	1,96		7,66
3140	3040	2380	2170	2720	2650	0,149	0,98	0,34		0,66
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³						0,074	0,12	0,14		0,13
δs1	δs2	δs3	---	---	---	Resíduo	0,00	0,00		0,00
2600	2630		---	---	---	Módulos de finura				
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³						2,126 3,035 7,000 2,580				
δsp	---	---	---	---	---	δp= 2877,00 kg/m ³				
1050	---	---	---	---	---	Vsp/Vp= 0,0137 m ³ /m ³				
						Vp= 0,344388 m ³ /m ³				
						Vw= 0,220408 m ³ /m ³				
						Vsp= 0,004718 m ³ /m ³				
						Vs= 0,430485 m ³ /m ³				
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros					Quantidades para um volume de: 25,00 litros					
C1=	432,6 kg				C1=	10813,8 g				
C2=	0,0 kg	Massa total, em kg			C2=	0,0 g	Massa total, em g			
CV=	0,0 kg	2341,9			CV=	0,0 g	58547,2			
MS=	14,9 kg	Razão água/(mat. cimentícios)			MS=	373,7 g	Razão água/(mat. cimentícios)			
FC=	543,3 kg	0,493			FC=	13582,7 g	0,493			
FG=	0,0 kg	Razão água/cimento			FG=	0,0 g	Razão água/cimento			
W=	220,4 litros	0,510			W=	5510,2 ml	0,510			
Sp=	4,72 litros	Razão água/finos			Sp=	117,95 ml	Razão água/finos			
S1=	559,6 kg	0,222			S1=	13990,8 g	0,222			
S2=	566,1 kg				S2=	14152,2 g				
S3=	0,0 kg				S2=	0,0 g				

Quadro A.15 - Resistência à compressão da argamassa com 2% de microssilica (amassadura de 25 litros)

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 2%	1	21-02-2011	28-02-2011	7	70,7	44,2	50,00	5,03	10,1
	2				84,6	52,9			
	3				84,7	52,9			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 2%	4	21-02-2011	21-03-2011	28	99,5	62,2	61,81	0,32	0,5
	5				98,6	61,6			
	6				98,6	61,6			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A.16 - Massa volúmica da argamassa com 2% de microssilica

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 2%	1 e 2	21-02-2011	28-02-2011	7	645,8	2522,7	2535,4	20,1	0,8
	3 e 4				655,0	2558,6			
	5 e 6	21-02-2011	21-03-2011	28	646,4	2525,0			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

ANEXO A.4
ARGAMASSA COM 4% DE MICROSSÍLICA

Quadro A.17 - Parâmetros reológicos para acerto da argamassa com 4% microssilica

ARGAMASSA: A.MS.55.I.FC.MS.0,80								
Mistura	Parâmetros da mistura			Leituras			Reologia	
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [seg.]	Gm	Rm
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.1	0,80	0,64	0,60	246	248	9,27	5,10	1,08
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.2	0,80	0,65	0,60	245	246	9,28	5,03	1,08
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.3	0,80	0,67	0,60	263	264	7,52	5,94	1,33

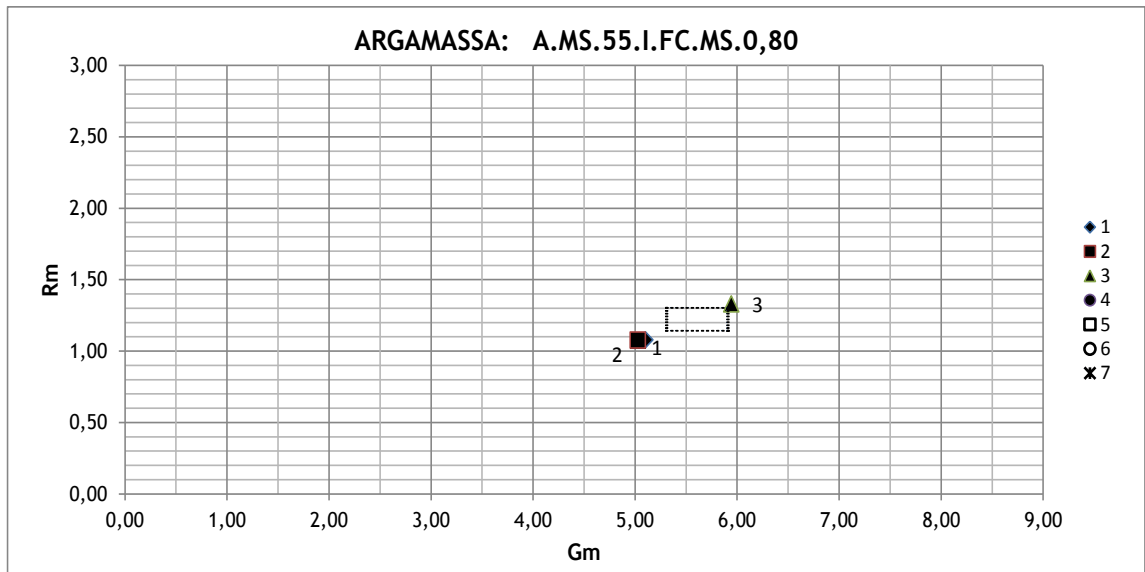


Figura A.4 - Tentativas para acerto da argamassa com 4% de microssilica

Quadro A.19 - Resistência à compressão da argamassa com 4% de microssilica (amassadura de 25 litros)

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 4%	1	21-02-2011	28-02-2011	7	69,4	43,4	45,75	6,28	13,7
	2				65,6	41,0			
	3				84,6	52,9			
Notas: 1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 % 2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca 3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹) 4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 4%	4	21-02-2011	21-03-2011	28	94,1	58,8	61,94	2,71	4,4
	5				101,6	63,5			
	6				101,6	63,5			
Notas: 1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 % 2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca 3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹) 4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

Quadro A.20 - Massa volúmica da argamassa com 4% de microssilica

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.MS.55.I.FC.MS.0,80.8 - 4%	1 e 2	21-02-2011	28-02-2011	7	652,2	2547,7	2512,8	33,3	1,3
	3 e 4				642,4	2509,4			
	5 e 6	21-02-2011	21-03-2011	28	635,2	2481,3			
Notas: 1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 % 2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca 3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹) 4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									