



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

Propriedades do betão auto-compactável com incorporação de agregados grossos reciclados

Mauro Rangel

Tese para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira

Co-orientador: Prof. Doutor Miguel Nepomuceno

Covilhã, Outubro de 2010

Agradecimentos

Este trabalho não estaria devidamente concluído sem que nele expressasse os meus mais sinceros agradecimentos e enorme reconhecimento àqueles que de alguma forma colaboraram no decurso da sua elaboração.

Ao Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira, orientador científico desta dissertação, quero expressar o meu mais profundo reconhecimento pelo apoio sempre revelados. Ao Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira devo a orientação, permanente incentivo e apoio concedido, sem não esquecer a aprendizagem adquirida. Os meus mais profundos agradecimentos.

Ao Prof. Doutor Miguel Nepomuceno, co-orientador científico desta dissertação, expresso o meu profundo agradecimento, pela orientação, apoio e disponibilidade sempre revelados. Ao Professor gostaria também de agradecer as imensas sugestões que trouxe à discussão e o rigor das suas opiniões.

Ao Sr. Albino Alves do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade da Beira interior, pretendo manifestar a minha gratidão pela ajuda e dedicação.

Aos meus amigos João Costa, Jania Marques e Ana Quaresma pela amizade e apoio demonstrado e que de forma directa ou indirecta, contribuíram para a conclusão desta dissertação.

Um agradecimento especial a grande amiga Patrícia Sebastião pela amizade, apoio e incentivo sempre demonstrados. Agradeço teres tornado esta jornada muito mais fácil do que o que seria sem ti.

Por fim os que são primeiros, a minha família. Mãe, Irmã, Prima e Tios, obrigado por tudo. Obrigado pelo vosso incentivo incessante, pelo apoio, pela compreensão, e acima de tudo, pelo vosso amor.

Resumo

O betão auto-compactável apresenta significativas vantagens, em termos ambientais, quando comparado com o betão convencional vibrado: a ausência de ruídos e vibrações durante a betonagem, favorece um ambiente de trabalho mais saudável. Em teoria, o potencial do uso de agregados reciclados grossos na composição dos betões auto-compactáveis, aumenta o seu valor ecológico e por outro lado ficam, em parte, resolvidas as questões dos locais de eliminação de resíduos criados pela construção e demolição de estruturas.

Com o objectivo de estudar as propriedades do betão auto-compactável, com a incorporação de agregados reciclados grossos, levou-se a cabo uma fase experimental para o estudo destes mesmos agregados quando incorporados no betão auto-compactável em diferentes percentagens. Para tal, foram estudadas cinco composições de betões auto-compactáveis, com diferentes percentagens de agregados reciclados grossos: 0% (BRF), 10% (BCR10), 20% (BCR20), 30% (BCR30) e 40% (BCR40).

Os resultados obtidos, tanto ao nível do betão fresco (propriedades reológicas e auto-compatibilidade) como ao nível do betão endurecido (resistência a compressão, massa volumica e módulo de elasticidade dinámico), apresentam apenas pequenas discrepâncias. O que leva a acreditar que é viável, a incorporação de agregados reciclados grossos no betão auto-compactável.

Palavras-chave

Betão auto-compactável, Agregados grossos reciclados, Resíduos de construção e demolição, Propriedades do betão fresco, Propriedades do betão endurecido.

Abstract

The self-compacting concrete has significant advantages in environmental terms, when compared with the conventional vibrated concrete: the absence of noise and vibration during concreting, promotes a healthier work environment. In theory, the potential use of coarse recycled aggregates in the composition of self-compactable concrete, increases the ecological value and on the other hand are partly resolved the issues of waste disposal sites of waste generated by construction and demolition of structures.

In order to study the properties of self-compacting concrete, incorporating recycled coarse aggregate, it took out a study these same aggregates when incorporated into the self-compacting concrete in different percentages. To this end, are studied five compositions of self-compacting concrete, with different percentages of recycled coarse aggregates: 0% (BRF), 10% (BCR10), 20% (BCR20), 30% (BCR30) and 40% (BCR40).

The results, both for the fresh concrete (rheological properties and self-compatibility) as the level of the hardened concrete (compressive strength, density and dynamic modulus of elasticity), show only minor discrepancies. Which leads to believe that it is viable, the incorporation of coarse recycled aggregates in self-compacting concrete.

Keywords

Self-compacting concrete, Recycled concrete coarse aggregates, Construction and Demolition Waste, Properties of fresh concrete, properties of hardened concrete.

Índice

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2 OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE	3
2.1 BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL	3
2.1.1 <i>Origem</i>	3
2.1.2 <i>Definição</i>	3
2.1.3 <i>Vantagens em relação ao betão convencional</i>	3
2.1.4 <i>Desvantagens em relação ao betão convencional</i>	4
2.1.5 <i>Constituintes do betão auto-compactável</i>	4
2.1.5.1 Materiais finos	4
2.1.5.1.1 Cimentos	5
2.1.5.1.2 Adições tipo I – adições quase inertes	6
2.1.5.1.2.1 Fíler calcário	6
2.1.5.1.2.2 Fíler granítico	6
2.1.5.1.3 Adições tipo II – adições pozolánicas ou hidráulicas latentes	6
2.1.5.1.3.1 Escórias de alto-forno de elevada finura	6
2.1.5.1.3.2 Cinzas volantes	7
2.1.5.1.3.3 Sílica de fumo (microsílica)	7
2.1.5.2 Adjuvantes	7
2.1.5.2.1 Superplastificantes	7
2.1.5.2.1 Agentes de viscosidade	8
2.1.5.3 Agregados finos	8
2.1.5.4 Agregados grossos	9
2.1.5.5 Água	9
2.1.5.6 Ar introduzido	9
2.1.6 <i>Propriedades do betão auto-compactável</i>	9
2.1.6.1 Estado fresco	9
2.1.6.1.1 Reologia	9
2.1.6.1.1 Trabalhabilidade	11
2.1.6.1.1.1 Capacidade de enchimento	11
2.1.6.1.1.2 Resistência à segregação	12

2.1.6.1.1.3	Capacidade de passagem	12
2.1.6.1.2	Ensaio do betão fresco	13
2.1.6.1.2.1	Ensaio de espalhamento (“Slump-flow”).....	13
2.1.6.1.2.2	Ensaio de fluidez (“Funil-V”).....	14
2.1.6.1.2.3	Ensaio da “Caixa” ou da “Caixa-U”	14
2.1.6.1.2.4	Ensaio da “Caixa-L”	16
2.1.6.2	Estado endurecido.....	17
2.1.6.2.1	Resistência mecânica às tensões	17
2.1.6.2.2	Deformação sob cargas.....	17
2.1.6.2.3	Retracção	17
2.1.6.2.4	Durabilidade.....	17
2.1.7	<i>Métodos de cálculo das proporções das misturas</i>	18
2.1.7.1	Método Proposto por Okamura	18
2.1.7.2	Método proposto pela JSEC.....	19
2.1.7.3	Método proposto por Nepomuceno	20
2.1.7.3.1	Dados essenciais de base	21
2.1.7.3.2	Opções de base: Materiais.....	21
2.1.7.3.3	Estudos em argamassas	23
2.1.7.3.4	Cálculo das argamassas.....	28
2.1.7.3.5	Procedimento de amassadura	30
2.1.7.3.6	Ensaio de argamassa	30
2.1.7.3.7	Comportamento reológicos	31
2.1.7.3.8	Procedimento de o acerto da reologia das misturas	32
2.1.7.3.9	Calculo dos betões	34
2.1.7.3.10	Procedimentos de amassadura.....	36
2.1.7.3.11	Ensaio em betões	37
2.1.7.3.12	Comportamento reológico pretendido	39
2.1.7.3.13	Procedimento de acerto da reologia das misturas.....	39
2.2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	39
2.2.1	<i>Definição</i>	39
2.2.2	<i>Consequências ambientais da deposição de RCD</i>	40
2.2.3	<i>Processamento dos RCD</i>	40
2.2.3.1	Tipos de demolição.....	40
2.2.3.2	Centrais de reciclagem	41
2.2.4	<i>Regulamentação existente</i>	42
2.2.5	<i>Aplicação dos RCD</i>	44
2.2.5.1	Argamassas.....	44
2.2.5.2	Pavimentos rodoviários	45
2.2.5.3	Sistemas de drenagem	45
2.2.5.4	Betão	45

2.2.6	<i>Utilização de agregados reciclados grossos no betão auto-compactável.....</i>	46
2.3	CONCLUSÕES.....	50
CAPITULO 3 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL		53
3.1	INTRODUÇÃO	53
3.2	SELECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	53
3.2.1	<i>Ligante.....</i>	53
3.2.2	<i>Adição.....</i>	53
3.2.3	<i>Adjuvante.....</i>	54
3.2.4	<i>Agregados</i>	54
3.2.4.1	Agregados finos	54
3.2.4.2	Agregado grosso	55
3.2.5	<i>Água de amassadura.....</i>	58
3.3	ESTUDO EM ARGAMASSAS.....	58
3.3.1	<i>Procedimento de amassadura.....</i>	58
3.3.2	<i>Ensaio em argamassa.....</i>	59
3.3.2.1	Ensaio de Fluides	59
3.3.2.2	Ensaio de espalhamento.....	60
3.4	ESTUDO EM BETÕES.....	61
3.4.1	<i>Ensaio no betão em estado fresco.....</i>	62
3.4.1.1	Ensaio de espalhamento.....	62
3.4.1.2	Ensaio de fluides.....	63
3.4.1.3	Ensaio da Caixa-L	64
3.4.1.4	Produção e preparação de provetes para os ensaios de compressão.....	65
3.4.2	<i>Ensaio do betão em estado endurecido.....</i>	66
3.4.2.1	Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.....	66
3.4.2.2	Ensaio de compressão.....	67
CAPITULO 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		69
4.1	GENERALIDADES	69
4.2	MASSA ESPECÍFICA DOS MATERIAIS FINOS.....	69
4.1	ENSAIOS DOS AGREGADOS	69
4.1.1	<i>Análise granulométrica</i>	69
4.1.1.1	Agregados finos	70
4.1.1.2	Agregados grossos naturais.....	71
4.1.1.3	Agregados grossos reciclados.....	72
4.1.1.4	Curva granulométrica da mistura dos agregados finos	73
4.1.1.5	Curva granulométrica da mistura dos agregados grossos naturais	75
4.1.2	<i>Massa volúmica e absorção de água dos agregados finos</i>	76

4.1.3	<i>Massa volúmica e absorção de água dos agregados grossos</i>	76
4.1.4	<i>Baridade dos agregados grossos</i>	77
4.2	ENSAIO EM ARGAMASSAS	78
4.3	ENSAIOS NO BETÃO EM ESTADO FRESCO.....	79
4.4	ESTUDO DO BETÃO EM ESTADO ENDURECIDO	81
4.4.1	<i>Resistência à compressão</i>	81
4.4.2	<i>Massa volúmica</i>	83
4.4.3	<i>Módulo de elasticidade dinâmico</i>	84
CAPÍTULO 5- CONCLUSÕES		87
CAPÍTULO 6- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS		89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		91
ANEXOS		95

Lista de Figuras

Figura 2.1- BTRHEOM [27]	10
Figura 2.2- BML [27].....	10
Figura 2.3- Formações de pontes [27].....	12
Figura 2.4- Ensaio de espalhamento [4].....	13
Figura 2.5- Ensaio Funil V [4].....	14
Figura 2.6- Esquema do ensaio da “caixa U ” [27].....	15
Figura 2.7- Esquema da auto-compatibilidade da “caixa U”[27]	15
Figura 2.8- Esquema de funcionamento do ensaio da “Caixa” [27].....	16
Figura 2.9- Ensaio da “Caixa-L” [4]	16
Figura 2.10- Método de concepção da composição proposto por Okamura et al [33].....	18
Figura 2.11- Método de concepção da composição proposto pela JSCE [33]	19
Figura 2.12- Método de concepção da composição proposto por Nepomuceno [27].	20
Figura 2.13- Curva de referência dos agregados finos [27]	22
Figura 2.14- Curva de referência dos agregados grossos [27]	23
Figura 2.15- Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão W/C [27].....	23
Figura 2.16- Relação f_{Ad} versus W/C para as famílias com CEM I 42,5R e filer calcário [27]	24
Figura 2.17- Relação f_{Ad} versus W/C para as famílias com CEM I 42,5R e filer granítico [27].....	24
Figura 2.18- Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM I 42,5R e cinzas volantes [27].....	25
Figura 2.19- Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM II/B-L32,5N e filer calcário [27]	25
Figura 2.20- Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM II/B-L32,5N e filer granítico [27]	25
Figura 2.21- Relação f_{Ad} vs W/C para famílias com CEM II/B-L32,5N e cinzas volantes [27].....	26
Figura 2.22- Relação V_p/V_s versus V_w/V_p para as famílias com CEM II/B-L32,5N [27]	26
Figura 2.23- Relação V_p/V_s versus V_w/V_p para as famílias com CEM I 42,5R [27]	27
Figura 2.24- Relação V_w/V_p versus $Sp/p\%$ para as famílias com CEM II/B-L32,5N [27]	27
Figura 2.25- Relação V_w/V_p versus $Sp/p\%$ para as famílias com CEM I 42,5R [27].....	27
Figura 2.26- Procedimento de mistura [27]	30
Figura 2.27- Cone para o ensaio de espalhamento em argamassas [27]	31
Figura 2.28- Funil-V para o ensaio de fluidez das argamassas [27].....	31
Figura 2.29- Alterações na reologia com o aumento de V_w/V_p mantendo $Sp/p\%$ constante [27].....	32
Figura 2.30- Alterações na reologia com o aumento de $Sp/p\%$ mantendo V_w/V_p constante [27].....	33
Figura 2.31 Relação entre MN e H_2/H_1 [27].....	33
Figura 2.32- Sequência de amassadura adoptada para os betões [27].....	37
Figura 2.33- Ensaio de espalhamento para o betão [27]	37
Figura 2.34- Funil-V para o ensaio de fluidez do betão [27]	38

<i>Figura 2.35- Caixa-L para o ensaio de auto-compactabilidade do betão [27]</i>	38
<i>Figura 2.36- Ensaio de espalhamento [18]</i>	47
<i>Figura 2.37- Ensaio da caixa L [18]</i>	48
<i>Figura 2.38- Ensaio de resistência a compressão [14]</i>	49
<i>Figura 2.39- Ensaio de resistência a tracção [18].</i>	49
<i>Figura 2.40- Ensaio de absorção de água [14]</i>	50
<i>Figura 3.1- Areia AF</i>	55
<i>Figura 3.2- Areia AG</i>	55
<i>Figura 3.3 Brita B1</i>	56
<i>Figura 3.4- Brita B2</i>	56
<i>Figura 3.5- Britadeira</i>	56
<i>Figura 3.6- Agregados britados</i>	57
<i>Figura 3.7- Agregados reciclados grossos BR1</i>	57
<i>Figura 3.8- Agregados reciclados grossos BR2</i>	57
<i>Figura 3.9- Misturadora de argamassas</i>	59
<i>Figura 3.10- Ensaio de fluidez das argamassas</i>	60
<i>Figura 3.11- Cone de espalhamento das argamassas</i>	60
<i>Figura 3.12- Ensaio de espalhamento das argamassas</i>	61
<i>Figura 3.13- Mesa de espalhamento</i>	62
<i>Figura 3.14- Ensaio de espalhamento</i>	63
<i>Figura 3.15- Ensaio de fluidez</i>	63
<i>Figura 3.16- Posicionamento e nivelamento da Caixa-L</i>	64
<i>Figura 3.17- Enchimento da Caixa-L</i>	64
<i>Figura 3.18- Fim do movimento do betão na Caixa L</i>	65
<i>Figura 3.19- Provetes de betão</i>	66
<i>Figura 3.20- Aparelho de medição da velocidade de ultra-sons em betão</i>	66
<i>Figura 4.1 Curva granulométrica dos agregados finos</i>	71
<i>Figura 4.2 Distribuição granulométrica dos agregados grossos naturais</i>	72
<i>Figura 4.3 - Distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados</i>	73
<i>Figura 4.4 – Curva granulométrica da mistura dos agregados finos</i>	74
<i>Figura 4.5 - Distribuição granulométrica da mistura dos agregados grossos naturais</i>	76
<i>Figura 4.6 - Parâmetros reológicos das diferentes argamassas.</i>	79
<i>Figura 4.7 - Parâmetros reológicos dos diferentes betões</i>	81
<i>Figura 4.8 - Resumo das resistências à compressão</i>	82
<i>Figura 4.9- Resumo das massas volúmicas dos betões</i>	84
<i>Figura 4.10 - Resultados médios do módulo de elasticidade</i>	85

Lista de Tabelas

<i>Quadro 2.1- Curva de referência dos agregados finos [27]</i>	21
<i>Quadro 2.2 Curva de referência dos agregados grossos [27].</i>	22
<i>Quadro 2.3- Composição dos agregados reciclados [17]</i>	43
<i>Quadro 2.4- Requisitos dos agregados [17].</i>	43
<i>Quadro 2.5- Classes de resistência e de exposição ambiental permitidas [17]</i>	44
<i>Quadro 2.6- Distribuição granulométrica dos agregados [18]</i>	46
<i>Quadro 2.7- Composições das misturas [18]</i>	47
<i>Quadro 2.8- Resumo dos ensaios em betão fresco [18]</i>	48
<i>Quadro 4.1- Massa volúmica dos materiais finos</i>	69
<i>Quadro 4.2 Distribuição granulométrica dos agregados finos</i>	70
<i>Quadro 4.3- Distribuição granulométrica dos agregados grossos naturais</i>	71
<i>Quadro 4.4 - Distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados</i>	72
<i>Quadro 4.5- Distribuição granulométrica da mistura dos agregados finos</i>	74
<i>Quadro 4.6 – Distribuição granulométrica da mistura dos agregados grossos naturais</i>	75
<i>Quadro 4.7– Massa volúmica e absorção de água dos agregados finos</i>	76
<i>Quadro 4.8 – Massa volúmica e absorção de água dos agregados grossos</i>	77
<i>Quadro 4.9 – Baridade dos agregados grossos</i>	77
<i>Quadro 4.10 - Parâmetros reológicos das diferentes argamassas.</i>	78
<i>Quadro 4.11- Parâmetros reológicos dos diferentes betões</i>	80
<i>Quadro 4.12- Resumo das resistências à compressão</i>	82
<i>Quadro 4.13 – Resumo das massas volúmicas dos betões</i>	83
<i>Quadro 4.14 - Resultados médios do módulo de elasticidade</i>	85

Siglas

BAC	Betão Auto-Compactável
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (Portugal)
NP	Norma Portuguesa
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les constructions, Paris (France)
UBI	Universidade da Beira Interior

Simbologia

μ	Viscosidade plástica
δ_i	Massa volúmica do material i
AF	Areia fina
AG	Areia grossa
a_i	Percentagem unitária do agregado fino i no volume absoluto do total dos agregados finos
B1	Brita 3/6
B2	Brita 6/15
BR1	Agregado reciclado 1
BR2	Agregado reciclado 2
BRC10	Betão auto-compactável com 10 % de agregados reciclados
BRC20	Betão auto-compactável com 20 % de agregados reciclados
BRC30	Betão auto-compactável com 30 % de agregados reciclados
BRC40	Betão auto-compactável com 40 % de agregados reciclados
BRF	Betão auto-compactável referencia com 0% de agregados reciclados
C_i	Massa do cimento i na mistura
C_v	Massa do cimento i na mistura
D_m	Diâmetro médio de espalhamento no ensaio de espalhamento de argamassas e betões
D_o	Diâmetro inicial na base do cone no ensaio de espalhamento de argamassas e betões
Fad	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)
FC	Massa do fíler calcário na mistura

fci	Percentagem unitária do cimento i no volume absoluto do total de finos (Vp)
Fcm,28	Valor médio da resistência à compressão do betão aos 28 dias de idade
ffc	Percentagem unitária de fíler calcário no volume absoluto do total de finos (Vp)
ffg	Percentagem unitária de fíler granítico no volume absoluto do total de finos (Vp)
FG	Massa do fíler granítico na mistura
fi	Percentagem unitária do material fino i no volume absoluto do total de finos (Vp)
fms	Percentagem unitária de microssílica no volume absoluto do total de finos (Vp)
Gc	Área de espalhamento relativa no ensaio de espalhamento do betão
Gi	Massa do agregado fino i na mistura
gi	Percentagem unitária do agregado grosso i no volume absoluto do total dos agregados grossos (Vg)
Gm	Área de espalhamento relativa no ensaio de espalhamento da argamassa
H	Altura atingida pela coluna de betão nos ensaios da Caixa e Caixa-U após a abertura da comporta e cessação do movimento do betão
H1	Altura do betão na coluna vertical da Caixa-L no final do ensaio e após cessar o movimento do betão, expressa em mm
H2	Altura do betão na extremidade da Caixa-L no final do ensaio e após cessar o movimento do betão
H2/H1	Razão entre a altura do betão na extremidade da Caixa-L (H2) e na coluna vertical (H1), no final do ensaio e após cessar o movimento do betão
MN	Número de mistura que designa o produto do parâmetro (Vp/Vs) pelo parâmetro (Vm/Vg)
Ms	Massa da microssílica na mistura
R7/R28 [%]	Percentagem de resistências iniciais
Rc	Velocidade relativa de escoamento no ensaio de fluidez do betão, em s ⁻¹
Rm	Velocidade relativa de escoamento no ensaio de fluidez da argamassa, em s ⁻¹

Si	Massa do agregado fino i na mistura
Sp	Volume de superplastificante na mistura, em l/m ³
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
T50	Tempo que o betão demora a atingir um diâmetro de 50 cm no ensaio de espalhamento do betão, expresso em segundos
Vg	Volume absoluto do total de agregados grossos da mistura, em m ³ / m ³
Vgi	Volume absoluto do agregado grosso 1 na mistura
Vi	Volume absoluto do material i na mistura
Vm	Volume absoluto da argamassa na mistura
Vm/Vg	Razão em volume absoluto entre as quantidades de argamassa e de agregados grossos na mistura
Vp	Volume absoluto do total de material fino
Vp/Vs	Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de materiais finos e de agregados finos na mistura
Vs	Volume absoluto do total de agregados finos
Vsi	Volume absoluto do agregado fino i na mistura
Vsp	Volume de superplastificante da mistura
Vsp/Vp	Razão em volume absoluto entre as quantidades de superplastificante e de materiais finos na mistura
Vv	Volume de vazios da mistura
Vw	Volume de água da mistura
Vw/Vp	Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de água e de materiais finos na mistura
W	Volume de água na mistura

W/C	Razão em massa entre as quantidades de água e de cimento da mistura
$\Delta_{\text{BRF}, 28 \text{ dias}}$	Diferenças relativamente ao BRF aos 28 dias
$\Delta_{\text{massa. volúmica}}$	Perdas de massa volúmica entre os 7 e os 28 dias de idade
$\Delta_{\text{módulo de elasticidade}}$	perdas do módulo de elasticidade dinâmico entre os 7 e os 28 dias
τ	Tensão de corte, em Pa
τ_0	Tensão inicial de corte, em Pa

Capítulo 1- Introdução

1.1 Enquadramento do tema

Actualmente existe uma evidenciada preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais. Nesse sentido têm-se incrementado a busca de alternativas sustentáveis de crescimento por parte de todos os segmentos da sociedade. Nesta nova visão, nenhuma sociedade poderá atingir a sustentabilidade sem que a indústria da construção civil passe por profundas transformações, já que a sua cadeia produtiva apresenta importantes impactos ambientais em todas as etapas do seu processo produtivo: extracção de matéria-prima, produção de materiais, construção, uso e demolição.

Um dos importantes impactos ocasionados pela actividade de construção civil é a formação dos resíduos de construção e demolição. Este tipo de resíduo tem grande impacto no meio ambiente, sendo que a sua disposição inadequada em áreas livres impróprias para esse fim resulta em efeitos negativos para o ambiente local. Entre as principais interferências pode-se citar a alteração da paisagem, dificuldades impostas ao tráfego de pedestres e veículos, comprometimento da drenagem urbana, assoreamento de recursos hídricos e a multiplicação de doenças. Neste sentido, a transformação destes resíduos em fonte alternativa de matéria-prima dentro do próprio sector que a produziu constitui um desafio para o meio técnico-científico [20].

O betão corrente exige uma compactação forçada para atingir a grande compacidade compatível com as resistências e durabilidade requeridas. O método de compactação privilegiado é a vibração do betão fresco com agulha, após colocação no interior das cofragens. Contudo, a vibração provoca atrasos e custos acrescidos. Além disso, poderá ser uma fonte de sérios problemas de saúde tanto para as pessoas da obra bem como da zona circundante do local de construção.

Foi desenvolvido um novo tipo de betão sob o nome de “betão auto-compactável”. Com este novo material a necessidade de vibração foi completamente eliminada, pelo que, muitas vezes é descrito como tolerante, porque não é sensível a variações da qualidade da mão-de-obra, e silencioso pela eliminação do ruído. Em certos casos da utilização deste tipo de betão, a resistência deixa de ser utilizada como indicador da qualidade passando a ser a trabalhabilidade o aspecto mais relevante.

O betão auto-compactável apresenta significativas vantagens em termos ambientais, quando comparado com o betão corrente vibrado, como referido no parágrafo anterior: a ausência de ruídos e vibrações durante a betonagem favorece um ambiente de trabalho mais saudável. Em teoria, o potencial do uso de agregados reciclados na composição dos betões auto-compactáveis aumenta o

seu valor ecológico e, por outro lado, ficam resolvidas, em parte, as questões dos locais de eliminação de resíduos criados pela construção e demolição de estruturas.

1.2 Objectivos da dissertação

O presente trabalho teve como objectivo principal o estudo das propriedades dos betões auto-compactáveis com incorporação de agregados grossos reciclados. Dado tratar-se de um assunto relativamente desconhecido em Portugal, a revisão do estado actual do conhecimento sobre a incorporação de agregados reciclados no betão auto-compactável, desenvolvido em países estrangeiros, foi essencial para o avanço deste trabalho. Para o estudo das composições dos betões auto-compactáveis, o método usado é o método proposto por Nepomuceno [27].

Em síntese, a satisfação dos objectivos fundamentais acima referidos é atingida através do cumprimento do seguinte conjunto de etapas: elaboração de uma pesquisa bibliográfica sobre o estado actual do conhecimento no que respeita à utilização de agregados reciclados em betões auto-compactáveis, elaboração de uma fase experimental que inclui a produção de betões com diferentes percentagens de substituição do agregado natural por agregado reciclado e, por último, a avaliação dos resultados obtidos, quer ao nível das propriedades do betão no estado fresco, quer no estado endurecido.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

O Capítulo 1 está reservado à descrição dos objectivos e da estrutura que constituem o presente trabalho.

O Capítulo 2 dedica-se a um levantamento do estado de arte, a nível nacional e internacional, no que se refere ao betão auto-compactável, aos resíduos de construção e demolição e à sua reutilização.

O Capítulo 3 descreve o programa experimental desenvolvido, nomeadamente ao nível dos ensaios realizados aos agregados, argamassa, betão no estado fresco e no estado endurecido.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos durante a campanha experimental, tentando extrair conclusões, aferindo a variação de desempenho dos betões com o aumento da incorporação de agregados grossos reciclados.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões da investigação realizada.

No Capítulo 6 apresentam-se algumas propostas para trabalhos futuros.

Finalmente, apresentam-se as referências bibliográficas e os anexos referenciados ao longo do texto.

Capítulo 2 - Estado da arte

2.1 Betão auto-compactável

2.1.1 Origem

De acordo com Dias (2002) [7], as primeiras investigações iniciaram-se no Japão, em 1986, direccionadas para o estudo da durabilidade do betão em estruturas de betão armado, onde a qualidade não dependesse da mão-de-obra especializada para a colocação e compactação, uma vez que o betão corrente exige mão-de-obra especializada para o compactar de forma adequada. No entanto, esse tipo de profissionais especializados e de qualidade tinha vindo a decrescer gradualmente no Japão e por conseguinte a qualidade das obras de betão também decresceu. Por isso o objectivo seria o de conseguir obter estruturas de betão duráveis independentes da mão-de-obra especializada. Surgiu então a ideia de desenvolvimento desta nova tecnologia do betão auto-compactável.

2.1.2 Definição

O betão auto-compactável (BAC) é um material homogéneo, capaz de se mover, libertar o ar e preencher completamente os espaços existentes entre as armaduras, no interior da cofragem, sem a influência de energia adicional de compactação, estando sujeito apenas à acção da gravidade. Deve ser resistente à ocorrência de segregação, de que são exemplos a exsudação e o assentamento das partículas mais grossas (sedimentação). Num BAC é também possível a existência de um volume de ar residual, tal como ocorre num betão corrente compactado adequadamente por vibração, ou um teor de ar aumentado artificialmente para, por exemplo, aumentar a resistência à acção de gelo e degelo [33].

2.1.3 Vantagens em relação ao betão convencional

O betão auto-compactável apresenta inúmeras vantagens em relação ao betão convencional, tais como as que a seguir se descrevem [27]:

- ✓ Melhoria da produtividade

Com a eliminação do trabalho de compactação, existe um aumento da velocidade e uma redução dos custos de construção.

- ✓ Melhoria do ambiente de trabalho

Com a eliminação do ruído e do esforço físico necessário para a vibração dá-se uma melhoria no ambiente de trabalho, e também a redução do ruído emitido para os prédios residenciais vizinhos à obra.

- ✓ Melhoria da Homogeneidade

Um dos maiores problemas do betão convencional vibrado é a inadequada homogeneidade, reduzindo assim a durabilidade das estruturas. O desenvolvimento do betão auto-compactável veio solucionar este problema, na obtenção de estruturas mais homogéneas.

- ✓ Outras melhorias

A existência de situações de difícil acesso para vibradores. Com o uso do betão auto-compactável, existe uma maior facilidade de resolver estas situações de modo racional.

2.1.4 Desvantagens em relação ao betão convencional

O betão auto-compactável apresenta algumas desvantagens quando comparado com o betão corrente [27]:

- ✓ Custo

O elevado custo do betão auto-compactável, comparativamente ao betão convencional, que resulta em geral das elevadas percentagens de materiais finos. Embora não sejam contabilizadas as vantagens que indirectamente a utilização do BAC poderá representar.

- ✓ Propriedades no estado endurecido

Em relação ao betão corrente, o BAC apresenta uma maior susceptibilidade a fenómenos de retracção e fluência. A solução poderá passar pela optimização das misturas, nomeadamente a redução dos materiais finos através da optimização da fase agregado.

2.1.5 Constituintes do betão auto-compactável

2.1.5.1 Materiais finos

Os materiais finos incluem todas as partículas finas do betão, tais como: os cimentos e as adições (quase inertes ou hidráulicas latentes). Em alguns casos são também contabilizados como materiais finos as partículas finas que são transportadas pelos agregados, em especial os agregados finos [27].

A Norma Portuguesa NP-ENV206 [28] define adição como um material inorgânico, finamente dividido que pode ser adicionado ao betão com a finalidade de melhorar certas propriedades ou para

adquirir propriedades especiais. A norma, ainda considera dois tipos de adições: adições do tipo I - quase inertes e as adições do tipo II - pozolánicas ou hidráulicas latentes.

2.1.5.1.1 Cimentos

De acordo com Nunes (2001) [33] a alta fluidez do BAC é conseguida basicamente pela elevada dispersão das partículas de cimento proporcionada pelos adjuvantes. A interacção química entre os componentes do cimento e os superplastificantes desempenha deste modo um papel importante na dispersão das partículas, mas essa dispersão pode ser também afectada pelas características dos restantes materiais finos.

Devido rápida hidratação inicial, que ocorre nos primeiros minutos pós o contacto com a água, o aluminato tricálcico (C_3A) e o alumino-ferrato tetracálcico (C_4AF), absorvem rapidamente uma quantidade substancial de moléculas dos adjuvantes na sua superfície. O restante adjuvante é posteriormente absorvido na superfície do silicato tricálcico (C_3S) e silicato bi-cálcico (C_2S), que são os componentes em maior percentagem na composição do cimento. Deste modo, a quantidade absorvida pelo silicato tricálcico (C_3S) e silicato bi-cálcico (C_2S) é dependente da quantidade inicialmente absorvida no aluminato tricálcico (C_3A) e no alumino-ferrato tetracálcico (C_4AF) [27,33].

Para cimentos ricos em aluminato tricálcico (C_3A) e alumino-ferrato tetracálcico (C_4AF), a absorção dos adjuvantes não é uniforme ao longo da superfície do cimento, pelo que a acção de dispersão é prejudicada. Para além disso, a “etringite”, produto da hidratação dos (C_3A) e (C_4AF) com o gesso, interage com as partículas de cimento e reduz a fluidez. Consequentemente, os cimentos Portland de baixo calor de hidratação com pequena fase intersticial de (C_3A) e (C_4AF) ou cimento rico em (C_2S) acentuam eficazmente a acção dispersante dos superplastificantes e podem ser considerados adequados para o fabrico de betões auto-compactáveis. Particularmente, os cimentos ricos em “belite”, onde a quantidade de C_2S é alta, inibem o calor de hidratação e são ideais para usar em betões auto-compactáveis de alta resistência [27,33,].

De acordo com Nunes (2001) [33] a distribuição granulométrica das partículas de cimento e a sua forma podem ser considerados como factores físicos que influenciam o comportamento reológico das pastas. Por exemplo, se a superfície específica do cimento aumenta, o número de partículas na pasta aumenta, obtendo-se uma maior superfície de contacto com a água. Em consequência, a distância entre as partículas diminui e a frequência de colisão e os pontos de contacto entre estas partículas aumenta, conduzindo ao aumento da viscosidade plástica. Tem sido verificado que quanto maior for a compacidade do cimento melhor é a coesão da pasta.

2.1.5.1.2 Adições tipo I - adições quase inertes

2.1.5.1.2.1 Fíler calcário

O fíler calcário consiste em calcário pulverizado cujo principal componente é a calcite (CaCO_3), podendo apresentar uma superfície específica de 2500 a 8000 cm^2 /g. Do ponto de vista químico é quase inerte e por essa razão é uma adição do tipo I [33]. Este material é utilizado para aumentar a viscosidade da pasta, em especial, quando se pretende que o aumento da quantidade de finos não se traduza directamente num aumento da resistência do betão.

2.1.5.1.2.2 Fíler granítico

Existem poucos estudos quanto a utilização de fíler granítico em betões, no entanto em Nepomuceno (2005) [27], é descrita uma investigação onde é comparado o efeito do fíler calcário e das cinzas volantes com o fíler granítico em BAC. O estudo realizado revelou que, em geral, os consumos de superplastificante nos betões que incorporaram fíler granítico foram semelhantes aos consumos de superplastificante obtidos nos betões com adições de fíler calcário ou cinzas volantes, em condições de escoamento semelhantes. Nas mesmas condições, os consumos de água de amassadura em misturas com fíler granítico igualaram os consumos de água das misturas de referência só com cimento, independentemente da percentagem de substituição do cimento pela adição. Sob condições semelhantes, as dosagens de água das misturas que incorporaram fíler granítico superaram sempre os consumos de água das misturas com fíler calcário ou cinzas volantes.

No mesmo estudo, Nepomuceno [27] refere que o comportamento de misturas produzidas com esta adição revelou-se promissor, tendo em vista a sua utilização na produção de betões auto-compactáveis. Apesar de terem sido produzidos escassos betões com este material, os resultados obtidos indicam que o fíler granítico se revelou adequado, pelo menos em termos físicos, como adição mineral para substituição parcial do cimento na produção de betões auto-compactáveis.

2.1.5.1.3 Adições tipo II - adições pozolánicas ou hidráulicas latentes

2.1.5.1.3.1 Escórias de alto-forno de elevada finura

As escórias granuladas de alto-forno fundidas a alta temperatura são obtidas a partir de um subproduto da fabricação do “ferro-gusa”, no processo de fabricação do aço. Quando as escórias são arrefecidas suficientemente rápido em água, são obtidos grãos em forma de areia e vidro (amorfo) [27].

O pó constituído por escórias de alto-forno de elevada finura não inicia as reacções de hidratação imediatamente após o contacto com a água, uma vez que a superfície das partículas é vidrada e

lisa, mesmo que estas escórias sejam usadas como adições no betão, os efeitos adversos tais como o aumento da dosagem de água, não ocorrem [27].

Devido a tixotropia da pasta que incorpora escórias granuladas de alto-forno com elevada finura ser comparativamente menor que a tixotropia da pasta de cimento portland normal, a escória de alto-forno de elevada finura têm sido usada na produção de cimentos ou como adição em betões de elevada fluidez.

2.1.5.1.3.2 Cinzas volantes

As cinzas volantes são um subproduto obtido quando se queimam carvões pulverizados, numa central de energia. Estas são obtidas por precipitação electrostática ou mecânica das poeiras arrastadas dos gases de combustão da queima. A qualidade das cinzas varia com o tipo de carvão e da caldeira utilizada, especialmente aquelas que têm propriedades pozolánicas, são utilizadas na produção de betão aplicado num largo número de estruturas, principalmente em obras de arte. Trata-se de um pó fino constituído principalmente por partículas esféricas e vítreas composto essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 . Uma vez que as cinzas de boa qualidade apresentam uma forma esférica, a deformabilidade do betão é melhorada pelo efeito de rolamento. Por esta razão, as cinzas volantes são utilizadas frequentemente no BAC [27].

2.1.5.1.3.3 Sílica de fumo (microsílica)

A sílica de fumo é um subproduto industrial obtido a partir da produção de silício metálico, ligas de ferro-silício ou outros produtos siliciosos em fornos eléctricos a arco [27].

A sílica de fumo actua no betão de duas formas: Fisicamente, como fíler, densificando a microestrutura e quimicamente, ao reagir rapidamente com o hidróxido de cálcio libertado durante a hidratação do cimento para formar o silicato de cálcio hidratado [27].

As principais características são a melhoria da trabalhabilidade, diminuição da permeabilidade, comportamento mais favorável na cura térmica, efeito pozolánico e maior durabilidade do betão em meios agressivos. A sílica de fumo tem importância reconhecida na obtenção de betões de alta resistência e elevado desempenho [27].

2.1.5.2 Adjuvantes

2.1.5.2.1 Superplastificantes

Os superplastificantes utilizados no BAC são essencialmente de dois tipos: agentes redutores de água de alta gama e agentes introdutores de ar e redutores de água de alta gama. Os agentes redutores de água de alta gama são utilizados essencialmente na indústria dos produtos de betão. Os agentes introdutores de ar e redutores de água de alta gama melhoram a capacidade de

retenção da fluidez do betão. Além disto, o agente introdutor de ar mantém o teor de ar no betão num nível constante tendo sido utilizado em aplicações da indústria do betão-pronto que exige tempo para o transporte e colocação [33].

Até agora, os principais superplastificantes utilizados consistem em polímeros de naftaleno sulfonado (“salts of sulfonated naphthalene-formaldehyde condensates”, SNF), ou melamina sulfonada (“salts of sulfonated melamine -formaldehyde condensates”, SMF), mas têm sido desenvolvidos agentes baseados nos carboxilatos modificados (“polycarboxylate-based agents”, PC) com uma capacidade de redução da água melhorada. Estes últimos são os designados de superplastificantes da “nova geração”. Uma vez que é utilizada uma grande quantidade de superplastificantes num BAC há uma tendência para retardar o início da presa. A escolha do tipo de superplastificante deve ter em consideração este aspecto e ainda a interacção com outros adjuvantes [29].

2.1.5.2.1 Agentes de viscosidade

Os agentes de viscosidade, são usados para melhorar a resistência à segregação do betão auto-compactável. Estes podem ser também utilizados para reduzir os efeitos das variações nas propriedades da matéria-prima, especialmente a humidade das areias, durante a produção do BAC [27].

Em Nepomuceno (2005) [27], são descritos alguns estudos que mostram as variações que ocorrem na auto-compactabilidade (ensaio da “Caixa”), na capacidade de deformação (ensaio de espalhamento) e na velocidade de deformação (fluidez no “Funil-V”) do betão fresco face a oscilações da dosagem de água de amassadura. Neste estudo os agentes de viscosidade à base de glicol foram aqueles que proporcionaram uma maior estabilidade no ensaio de auto-compactabilidade (altura na “Caixa”), enquanto que os agentes de viscosidade à base de “welan gum” proporcionam maior estabilidade nos ensaios de avaliação da capacidade de deformação (diâmetro de espalhamento) e da velocidade de deformação (tempo de escoamento no “Funil-V”).

2.1.5.3 Agregados finos

Os agregados finos incluem normalmente as areias cuja máxima dimensão das partículas não excede os 5 mm. Em muitas situações, as partículas mais finas das areias abaixo de determinada dimensão são considerados como materiais finos. Nesses casos, os agregados finos passam a ser definidos como as partículas sólidas do betão com dimensão compreendida entre o valor de referência para as partículas finas e a máxima dimensão das partículas de areia. De acordo com Nepomuceno (2005) [27], no Japão são considerados como agregados finos as partículas inertes com dimensão compreendida entre os 0,090 mm e os 5 mm, enquanto na Europa os agregados finos podem variar entre 0,075 e 5 mm ou entre 0,125 e 5 mm.

Todas as recomendações usualmente estabelecidas para os agregados finos de betões correntes devem-se aplicar aos agregados finos para betões auto-compactáveis [27].

2.1.5.4 Agregados grossos

São considerados como agregados grossos todas as partículas inertes com diâmetro superior a 5 mm e para a máxima dimensão não são estabelecidos limites de referência. Tal como se referiu para os agregados finos, também neste caso, todas as recomendações usualmente estabelecidas para os agregados grossos de betões correntes se devem aplicar aos agregados grossos para betões auto-compactáveis.

2.1.5.5 Água

Além da função de hidratação do cimento e de molhagem da superfície dos agregados, a dosagem de água permite alterar a deformabilidade e a viscosidade do betão fresco. A água livre no betão define-se como sendo a quantidade de água presente na pasta subtraindo a água absorvida pelos finos e agregados finos.

2.1.5.6 Ar introduzido

A introdução de bolhas de ar no interior do betão, pela utilização de agentes introdutores de ar, é necessária para o aumento da resistência à acção de gelo-degelo do betão endurecido. No betão fresco, as bolhas de ar absorvem uma quantidade mínima de água na sua superfície. Uma vez que as bolhas de ar não são capazes de suportar o choque das partículas dos agregados tais como os finos, as bolhas de ar têm uma pequena influência na prevenção dos choques entre as partículas. No entanto, quando há falta de finos, permitem corrigir a granulometria, melhorando a trabalhabilidade, devido ao efeito lubrificante de “rolamento de esferas” das bolhas de ar [33].

2.1.6 Propriedades do betão auto-compactável

2.1.6.1 Estado fresco

A auto-compactabilidade significa a capacidade do betão fresco, depois de betonado, se mover e preencher todos os espaços no interior da cofragem, apenas por acção da gravidade. Em termos mecânicos esta propriedade está relacionada com a reologia do betão fresco, enquanto em termos práticos está relacionada com os parâmetros de trabalhabilidade.

2.1.6.1.1 Reologia

O betão auto-compactável no estado fresco pode ser descrito como uma suspensão de partículas. Contudo, esta abordagem é muito complexa, uma vez que o betão possui uma larga gama de

tamanhos de partículas e as propriedades do “fluido” variam com o tempo em função das reações químicas [27].

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 [27].

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.

Existem vários tipos de equipamentos para avaliar as propriedades reológicas do betão fresco, argamassas e pastas, dos quais se destacam os reômetros BML e BTRHEON representados nas figuras 2.1 e 2.2



Figura 2.1- BTRHEOM [27]



Figura 2.2- BML [27]

A tensão de corte τ'_0 (em Pa) e a viscosidade plástica μ' (Pa.s) são propriedades intrínsecas do betão e podem ser usadas em cálculos de elementos finitos para prever qualquer escoamento. Estudos realizados no LCPC confirmaram que estas duas propriedades podem ser grosseiramente estimadas através do ensaio de espalhamento. O diâmetro médio de espalhamento pode ser relacionado com a tensão de corte através da Equação 2.1, enquanto o tempo que o betão demora a atingir um

diâmetro de 500 mm no mesmo ensaio pode ser relacionado com a viscosidade plástica através da Equação 2.2 [27].

$$\tau'_{o} = (808 - Sl) \cdot \frac{M \cdot g}{11740} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

Sl é o diâmetro médio de espalhamento, em mm

g é a aceleração da gravidade

M é a densidade, em kg/m³.

$$\mu' = \frac{M \cdot g}{10000} \cdot (0,026 \cdot Sl - 2,39) \cdot T_{50} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde:

T₅₀ é o tempo que o betão demora a atingir um diâmetro de 500 mm no ensaio de espalhamento, medido em segundos.

2.1.6.1.1 Trabalhabilidade

2.1.6.1.1.1 Capacidade de enchimento

O significado de capacidade de enchimento no betão auto-compactável inclui, quer a capacidade de deformação, quer a velocidade com que este se deforma. Usando o ensaio de espalhamento, a capacidade de deformação pode ser avaliada através do diâmetro médio de espalhamento, enquanto que a velocidade de deformação pode ser avaliada a partir do tempo que o betão leva a atingir um diâmetro de 500 mm. Para se atingir uma boa capacidade de enchimento deve existir um bom balanço entre a capacidade de deformação e a velocidade de deformação, devendo o betão possuir baixo atrito entre as partículas e uma pasta com excelente deformabilidade [27].

Para se atingir uma adequada capacidade de enchimento, as seguintes acções devem ser consideradas [23]:

- Aumentar a deformabilidade da pasta:
 - ✓ Adjuvantes superplastificantes,
 - ✓ Equilíbrio da razão água / (materiais finos).
- Reduzir o atrito entre as partículas:
 - ✓ Baixo volume de agregados grossos (grande quantidade de pasta),
 - ✓ Distribuição óptima dos finos relativamente aos agregados e cimento usado.

2.1.6.1.1.2 Resistência à segregação

Uma boa resistência à segregação significa que a distribuição das partículas de agregado grosso no betão é relativamente equivalente em todas as localizações.

O betão auto-compactável não deve apresentar os seguintes tipos de segregação nem no estado estacionário nem no estado fluido [23]:

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

Para atingir uma adequada resistência à segregação, as seguintes acções devem ser consideradas [23]:

- Reduzir a segregação dos sólidos:
 - ✓ Limitar a quantidade de agregados,
 - ✓ Reduzir a máxima dimensão do agregado,
 - ✓ Baixa razão água / (materiais finos),
 - ✓ Usar um agente de viscosidade.
- Minimizar a exsudação - água livre:
 - ✓ Baixa dosagem de água,
 - ✓ Baixa razão água / (materiais finos),
 - ✓ Materiais finos com elevada superfície específica,
 - ✓ Usar um agente de viscosidade.

2.1.6.1.1.3 Capacidade de passagem

O betão auto-compactável deve possuir fluidez suficiente e ao mesmo tempo suficiente resistência à segregação para funcionar de forma eficiente. Nos casos onde existem aberturas estreitas na cofragem ou onde existe congestionamento de armaduras, uma exigência adicional deve ser atendida, nomeadamente, evitar o bloqueio dos agregados grossos provocado pela formação de “pontes” (figura 2.3) [27].

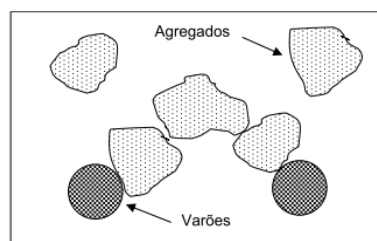


Figura 2.3- Formações de pontes [27]

Para atingir uma capacidade de passagem adequada, as seguintes acções devem ser consideradas [27]:

- Melhorar a coesão para reduzir a segregação do agregado:
 - ✓ Baixa razão água / (materiais finos),
 - ✓ Agente de viscosidade.
- Compatibilizar as características das aberturas e dos agregados grossos:
 - ✓ Baixo volume de agregados grossos,
 - ✓ Máxima dimensão dos agregados baixa.

2.1.6.1.2 Ensaio do betão fresco

2.1.6.1.2.1 Ensaio de espalhamento (“Slump-flow”)

O ensaio de espalhamento é o mais generalizado em todo o mundo para avaliar as propriedades do betão fresco auto-compactável. De acordo com Nepomuceno (2005) [27] este método é usado em betões muito fluidos com superplastificante e não se aplica a betões com agregados cuja máxima dimensão exceda os 40 mm.

O ensaio de espalhamento (figura 2.4) consiste em preencher o cone de Abrams de betão sem compactar, e em seguida levantá-lo, lentamente, deixando o betão movimentar-se em uma base plana. A média de duas medidas perpendiculares do betão estendido resulta no valor do parâmetro de extensão final do fluxo. O tempo medido em segundos, para o betão alcançar um diâmetro de 500 mm também é determinado e chamado de T_{50} .

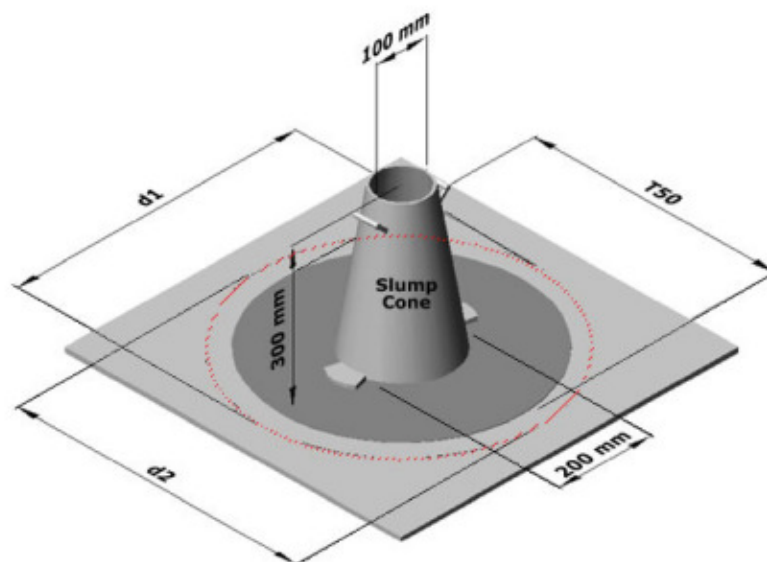


Figura 2.4- Ensaio de espalhamento [4]

Partir deste ensaio é possível recolher as seguintes informações (27):

- ✓ Valor do diâmetro médio de espalhamento (“Slump flow”);
- ✓ Tempo de escoamento T50
- ✓ Tempo de escoamento final (da remoção do cone até ao final do escoamento);
- ✓ Grau de segregação (observação visual).

2.1.6.1.2.2 Ensaio de fluidez (“Funil-V”)

O ensaio de fluidez com o “Funil-V” foi concebido para betões altamente fluidos incorporando superplastificantes e não se aplica a betões com agregados cuja máxima dimensão exceda os 25 mm [27].

O ensaio de fluidez (figura 2.5) consiste no seguinte: após o enchimento do funil, a comporta da base é aberta e dá-se início à contagem do tempo de descarga do betão, medido em segundos. A contagem termina quando, observando o funil de cima para baixo, surgir o primeiro raio de luz.

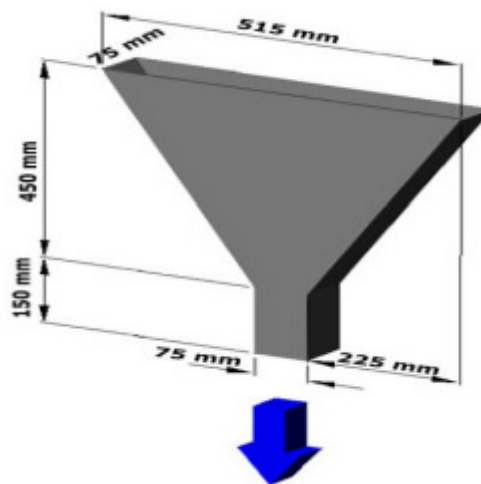


Figura 2.5- Ensaio Funil V [4]

O parâmetro normalmente medido neste ensaio é o tempo de descarga (t) medido em segundos. A partir deste parâmetro é frequente calcular-se a velocidade relativa do escoamento ($R_c = 10/t$).

2.1.6.1.2.3 Ensaio da “Caixa” ou da “Caixa-U”

Os equipamentos de ensaio “Caixa-U” e “Caixa” foram projectados para avaliar a capacidade de passagem em aberturas estreitas de betões frescos altamente fluidos. Eles reflectem a deformabilidade e o comportamento na ausência de bloqueio e descrevem a capacidade de enchimento e a capacidade de passagem do BAC [27].

O princípio de funcionamento do ensaio da “Caixa-U” é lustrado nas figuras 2.6 e 2.7. De acordo com Nepomuceno 2005 [27] os betões que apresentem uma altura de enchimento (H) na “Caixa-U” superior a 300 mm podem ser considerados como auto-compactáveis para aplicação em estruturas. Um betão com baixa capacidade de deformação conduz a valores baixos do parâmetro (H), conforme se ilustra à esquerda na Figura 2.7. Por outro lado, um betão com elevada capacidade de deformação pode também conduzir a baixos valores do parâmetro (H) se ocorrer o bloqueio da mistura na passagem pelo obstáculo, como resultado da segregação entre a argamassa e os agregados grossos, conforme se ilustra à direita na Figura 2.7.

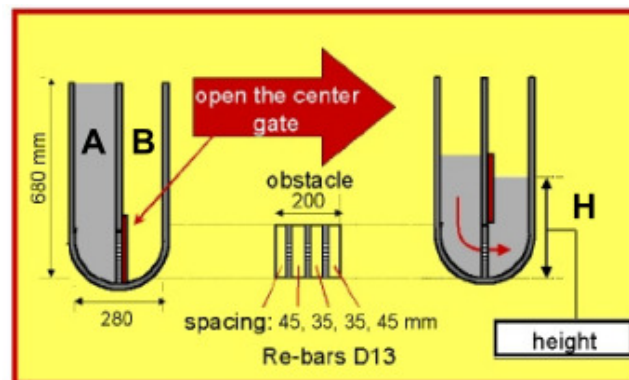


Figura 2.6- Esquema do ensaio da “caixa U ” [27]

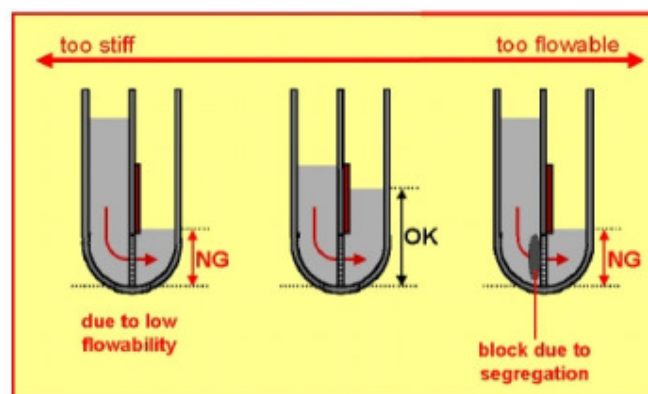


Figura 2.7- Esquema da auto-compatibilidade da “caixa U”[27]

O ensaio da “Caixa” difere do ensaio da “Caixa-U” pelo facto de apresentar uma base plana. Em consequência desta modificação, o ensaio da “Caixa” é mais sensível a betões com menor resistência à segregação, facilitando a sua detecção. O esquema de funcionamento do ensaio da “Caixa” é ilustrado na figura 2.8. Este método é usado em betões muito fluidos com superplastificantes e não se aplica a betões com agregados cuja máxima dimensão excede os 25 mm [27].

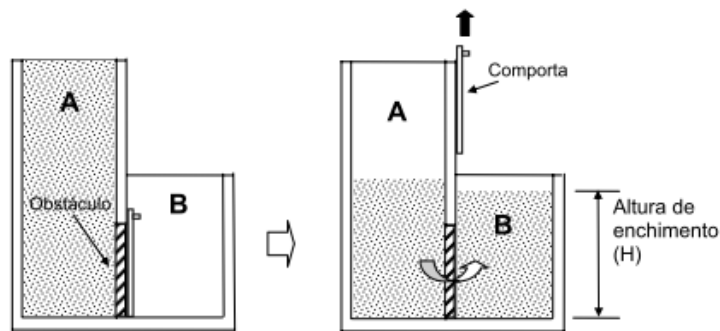


Figura 2.8- Esquema de funcionamento do ensaio da “Caixa” [27]

2.1.6.1.2.4 Ensaio da “Caixa-L”

O princípio de funcionamento do ensaio da “Caixa-L (figura 2.9) é muito semelhante àquele descrito para os ensaios da “Caixa-U” e “Caixa”. Após a abertura da comporta que separa os dois compartimentos, o betão escoar de um compartimento para o outro. Durante o escoamento do betão, é frequente medir-se o tempo que este demora a percorrer as distâncias de 200 mm (T20) e de 400 mm (T40), ambas medidas a partir da comporta. Uma vez cessado o movimento, procede-se à medição das alturas do betão nas extremidades [27].

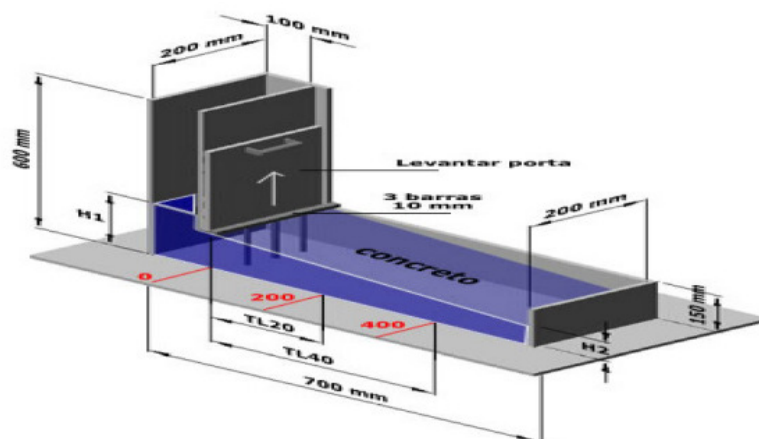


Figura 2.9- Ensaio da “Caixa-L” [4]

A partir deste ensaio é possível obter a seguinte informação:

- ✓ O valor do escoamento na “Caixa-L”
- ✓ O tempo para uma distância de escoamento particular (T20 e/ou T40);
- ✓ Tempo para completar o escoamento;
- ✓ A “taxa de bloqueio” (diferença de alturas)
- ✓ Grau de segregação (observação visual).

2.1.6.2 Estado endurecido

2.1.6.2.1 Resistência mecânica às tensões

Devido à microestrutura melhorada, o betão auto-compactável mostra frequentemente uma resistência à compressão mais elevada sob uma razão água/cimento equivalente à do betão corrente vibrado [27].

A resistência à tracção para betões correntes é em torno de 10 a 15 % da resistência à compressão. Esta grande diferença é atribuída à estrutura heterogénea e complexa do betão. Quanto maior a resistência à compressão do betão, maiores são as relações [4].

2.1.6.2.2 Deformação sob cargas

De acordo com Nepomuceno (2005) [27] a deformação dos betões é sensível às proporções dos agregados na mistura. Considerando o betão como sendo um compósito constituído por duas fases, a matriz formada pela pasta de cimento endurecida e as inclusões constituídas pelos agregados, as suas propriedades dependem das características elásticas de cada fase e das suas proporções. Os betões auto-compactáveis são por isso susceptíveis de serem mais deformáveis que os betões convencionais devido ao facto de possuírem uma maior quantidade de pasta.

2.1.6.2.3 Retracção

A escolha dos materiais constituintes irá influenciar, em maior ou menor extensão, a retracção do betão. Sendo que o uso de adições de fíler calcário com a adequada finura pode reduzir a retracção do betão auto-compactável [27].

Alguns estudos relatados por Skarendahl (2000) [37], mostram uma maior retracção de secagem no BAC comparativamente ao betão normal.

2.1.6.2.4 Durabilidade

Acima de tudo a durabilidade está relacionada com os parâmetros da mistura que afectam a densidade do betão e com a composição química dos ligantes (e a mineralogia dos agregados no que respeita às reacções alcali-agregado). As regras aplicáveis aos betões convencionais também se aplicam ao betão auto-compactável.

Em Nepomuceno (2005) [27], são referidos alguns casos que o BAC apresenta uma capacidade de transporte inferior devido à densa microestrutura causada pela ausência de vibração e o uso de uma grande quantidade de partículas finas. Isto traduz-se numa melhoria da durabilidade baseada numa reduzida carbonatação e redução de penetração de cloretos.

2.1.7 Métodos de cálculo das proporções das misturas

Devido a variação e disponibilidade dos materiais, é impossível produzir misturas universais. O que deve haver é um procedimento para a obtenção de misturas satisfatórias de betão auto-compactável, ou seja, métodos de composição adequados de forma a obter-se misturas com desempenhos diferentes usando os materiais disponíveis no local.

Todos os métodos desenvolvidos até à data têm as suas limitações e complexidades diferentes. Dos métodos de composição de betão auto-compactável divulgados, foram seleccionados, para além do método inserido no objectivo desta tese, o método proposto por Okamura e al. e o método proposto pela Sociedade Japonesa de Engenharia Civil (JSCE).

2.1.7.1 Método Proposto por Okamura

Okamura et al [6,34,35] propôs um método de estudo de composições de betão auto-compactável simples, com o intuito de se tornar comum o fornecimento deste betão por centrais de betão pronto. O método baseia-se em manter fixa a quantidade de agregados e ajustes da razão água/finos e dosagem de superplastificantes de forma a obter a auto-compactabilidade. Este método prevê os seguintes parâmetros representados na figura 2.10:

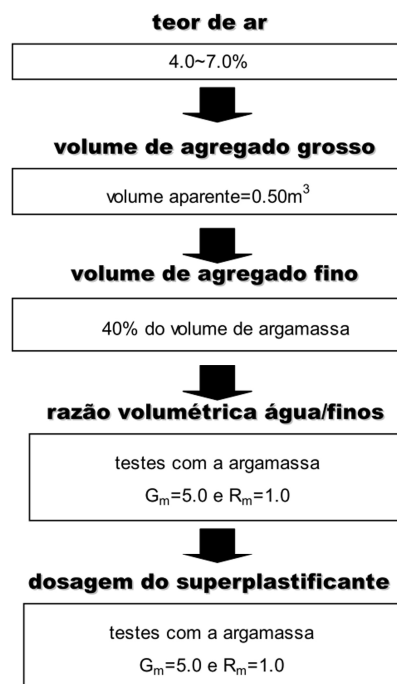


Figura 2.10- Método de concepção da composição proposto por Okamura et al [33].

Este método envolve ensaios em pasta e em argamassa e cada parâmetro é determinado independentemente, minimizando assim o número de ensaios necessários.

2.1.7.2 Método proposto pela JSEC

Em Julho de 1998, a Sociedade Japonesa de Engenharia Civil (JSCE) publicou recomendações para a construção com BAC, nas quais propõe um procedimento de obtenção da composição, apresentado esquematicamente na figura 2.11. Estas recomendações basearam-se em investigação realizada no passado e na experiência obtida com aplicações práticas mais recentes. Segundo este método, o volume de água, o volume de finos ou de ligante, por unidade de volume de betão, e a razão água/finos variam consoante o tipo de BAC que se está a estudar, isto é, do tipo agente de viscosidade ou do tipo finos [6, 22].

- Betão auto-compactável do “tipo finos”, em que a auto-compactabilidade é baseada na grande quantidade de finos presentes na mistura;
- Betão auto-compactável do “tipo agente de viscosidade”, onde a auto-compactabilidade é conseguida sobretudo com o recurso à utilização de agentes de viscosidade.

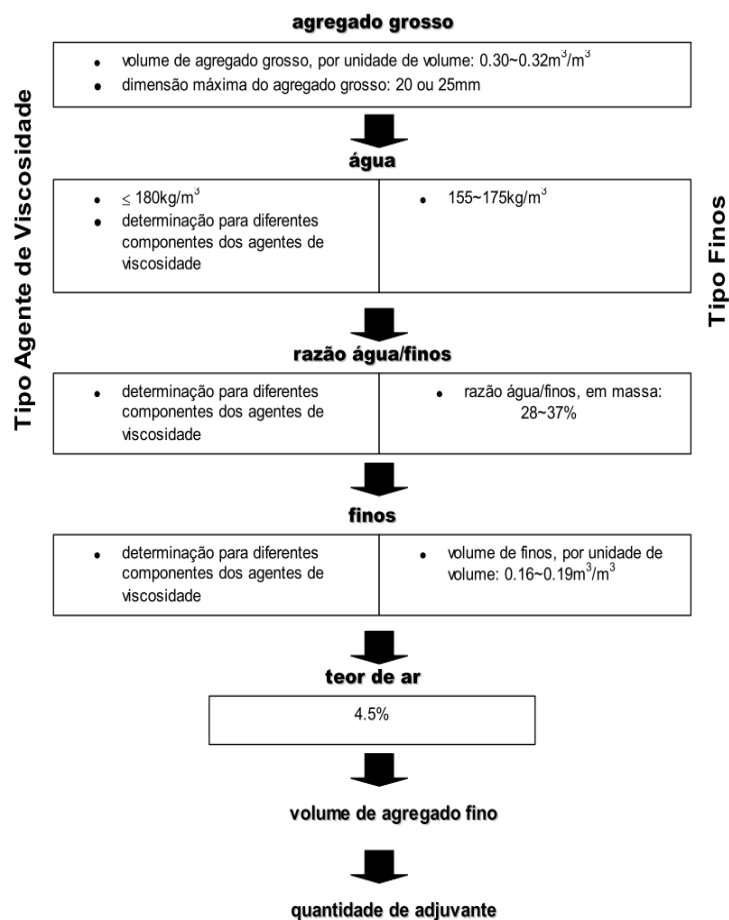


Figura 2.11- Método de concepção da composição proposto pela JSCE [33]

2.1.7.3 Método proposto por Nepomuceno

Nepomuceno (2005) [27] fez uma proposta que representa uma contribuição para o estudo de betões auto-compactáveis do tipo finos representando um refinamento do método de Okamura et al. e da JSCE.

Este método considera a análise separada das argamassas e betões como sugerem Okamura et al., define as propriedades reológicas das argamassas adequadas à obtenção de betões auto-compactáveis num intervalo próximo daquele proposto por Okamura et al., estabelece uma nova metodologia para obtenção dessas propriedades, introduz novos parâmetros para quantificar as dosagens de agregados finos (V_p/V_s) e de agregados grossos (V_m/V_g) das misturas, estabelece um novo parâmetro (MN) para quantificar o volume de agregados grossos de cada betão (V_m/V_g), adequado especificamente à argamassa que este incorpora tendo em vista a obtenção de determinado grau de auto-compactabilidade e utiliza simultaneamente o parâmetro (V_p/V_s) e a “família de finos” para controlar a resistência das argamassas e indirectamente a resistência dos betões com ela produzidos. Este método é composto por etapas, resumidas na figura 2.12.

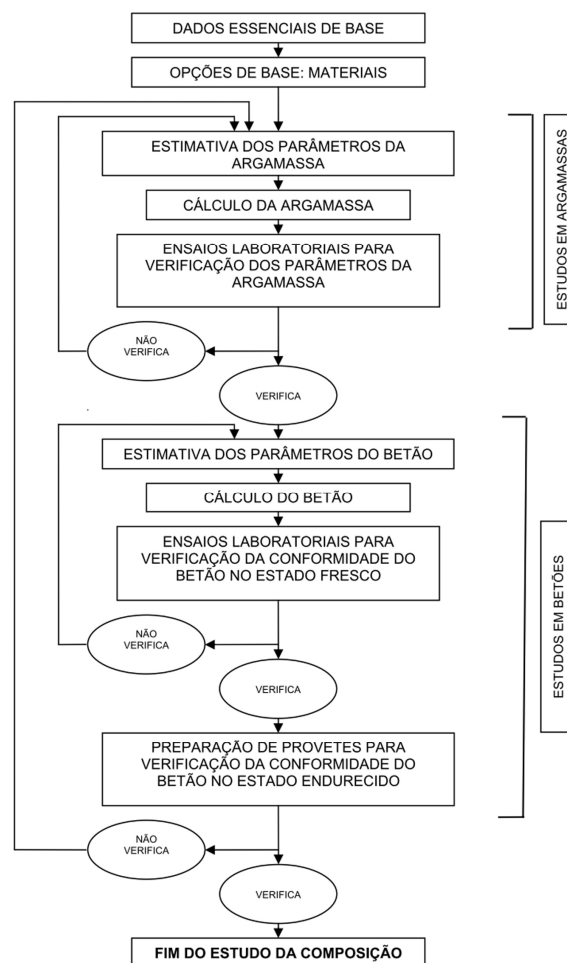


Figura 2.12- Método de concepção da composição proposto por Nepomuceno [27].

2.1.7.3.1 Dados essenciais de base

São designados como dados essenciais de base todos os elementos necessários a uma completa definição das propriedades pretendidas para o betão auto-compactável, quer no estado fresco, quer no estado endurecido, ou mesmo, na transição entre os dois estados. Para além disso, considera ainda os requisitos especiais de cada elemento a betonar, como o espaçamento entre armaduras, a classe de exposição ambiental, condições de transporte, condições de betonagem.

Em termos das propriedades do betão no estado endurecido, o método contempla a resistência à compressão, expressa pelo seu valor médio aos 28 dias de idade (f_{cm} , 28).

Em termos das propriedades do betão no estado fresco, o principal requisito é obtenção da auto-compactabilidade. O método propõe a adopção de agregados grossos com uma máxima dimensão do agregado mais grosso de 19,1 mm.

2.1.7.3.2 Opções de base: Materiais

Os materiais a utilizar são definidos tendo em consideração os dados essenciais de base. Se forem utilizadas apenas as correlações desenvolvidas neste método, a opção relativamente ao tipo de ligante deverá ser feita entre o cimento CEM II/B-L32,5N e o cimento CEM I 42,5R. Quanto ao tipo de adição mineral, poderá optar-se pela cinza volante, filer calcário ou filer granítico.

Relativamente à selecção dos agregados finos, pode-se optar por qualquer combinação de areias naturais roladas, desde que se garanta a obtenção de uma curva de referência do conjunto dos agregados finos ilustrada no Quadro 2.1 e na figura 2.13.

Quadro 2.1- Curva de referência dos agregados finos [27]

Peneiro	Malha [mm]	Areia 01	Areia 05	Mistura (Curva de Referência)
		a_1	a_2	
		0,40	0,60	
Percentagens acumuladas de passados				
3 \square	76,20	100,00	100,00	100,00
(*) 2 \square	50,80	100,00	100,00	100,00
1 \square $\frac{1}{2}$	38,10	100,00	100,00	100,00
(*) 1 \square	25,40	100,00	100,00	100,00
3/4 \square	19,10	100,00	100,00	100,00
(*) 1/2 \square	12,70	100,00	100,00	100,00
3/6 \square	9,52	100,00	100,00	100,00
N.º 4	4,76	100,00	99,94	99,96
N.º 8	2,38	99,97	98,56	99,12
N.º 16	1,19	99,89	84,75	90,81
N.º 30	0,590	91,06	43,13	62,30
N.º 50	0,297	48,16	2,97	21,05
N.º 100	0,149	11,49	0,21	4,72
N.º 200	0,074	2,04	0,05	0,85
Resíduo		0,00	0,00	0,00
Módulo de Finura \blacktriangleright		1,494	2,705	2,220
(*) Série secundária				
Peneiros para o cálculo do módulo de finura				

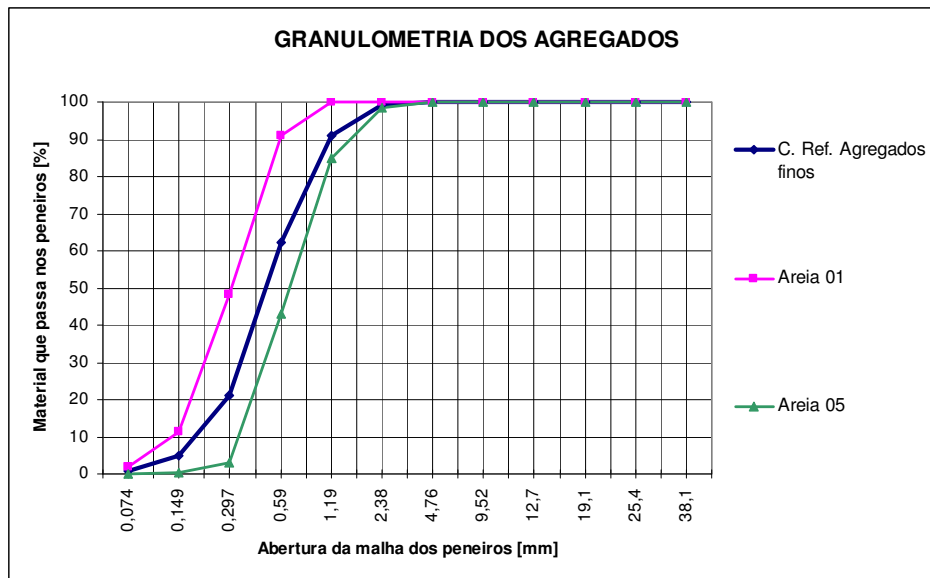


Figura 2.13- Curva de referência dos agregados finos [27]

Para os agregados grossos, poderá optar-se por qualquer combinação de material britado, desde que apresentem uma curva de referência próxima do conjunto dos agregados grossos ilustrada no Quadro 2.2 e na Figura 2.14.

Quadro 2.2 Curva de referência dos agregados grossos [27].

Peneiro	Malha [mm]	Brita 3/6	Brita 6/15	Mistura (Curva de Referência)
		g1	g2	
		0,50	0,50	
Percentagens acumuladas de passados				
3□	76,20	100,00	100,00	100,00
(*) 2□	50,80	100,00	100,00	100,00
1□½	38,10	100,00	100,00	100,00
(*) 1□	25,40	100,00	100,00	100,00
3/4□	19,10	100,00	100,00	100,00
(*) 1/2□	12,70	100,00	89,14	94,57
3/6□	9,52	100,00	49,79	74,90
N.º 4	4,76	70,84	2,24	36,54
N.º 8	2,38	11,68	0,29	5,99
N.º 16	1,19	4,28	0,20	2,24
N.º 30	0,590	2,46	0,16	1,31
N.º 50	0,297	1,46	0,12	0,79
N.º 100	0,149	0,90	0,09	0,50
N.º 200	0,074	0,50	0,05	0,28
Resíduo		0,00	0,00	0,00
Módulo de Finura ▶		5,084	6,471	5,777
(*) Série secundária				
Peneiros para o cálculo do módulo de finura				

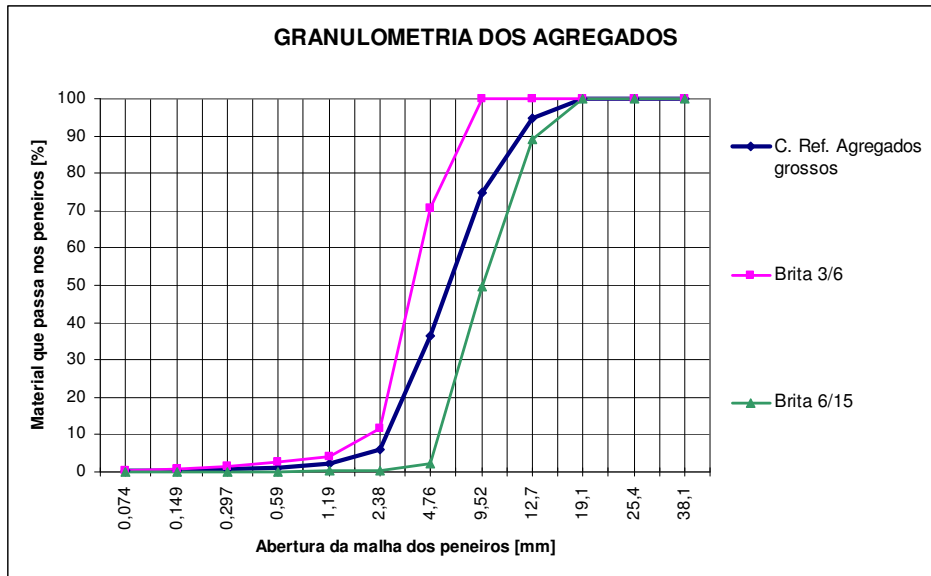


Figura 2.14- Curva de referência dos agregados grossos [27]

A máxima dimensão do agregado mais grosso está implicitamente definida na curva de referência do conjunto dos agregados grossos e não deverá ultrapassar os 19,1 mm.

2.1.7.3.3 Estudos em argamassas

Definidos os materiais a utilizar, o estudo da argamassa inicia-se com a definição da razão W/C adequada, tendo em vista a obtenção da resistência pretendida nos betões Assim, definida a resistência média pretendida para o betão, é possível estimar a razão W/C desse betão, a qual coincide com a razão W/C da argamassa. A relação entre a resistência à compressão do betão e a razão W/C em massa depende do tipo de cimento, como mostra a figura 2.15.

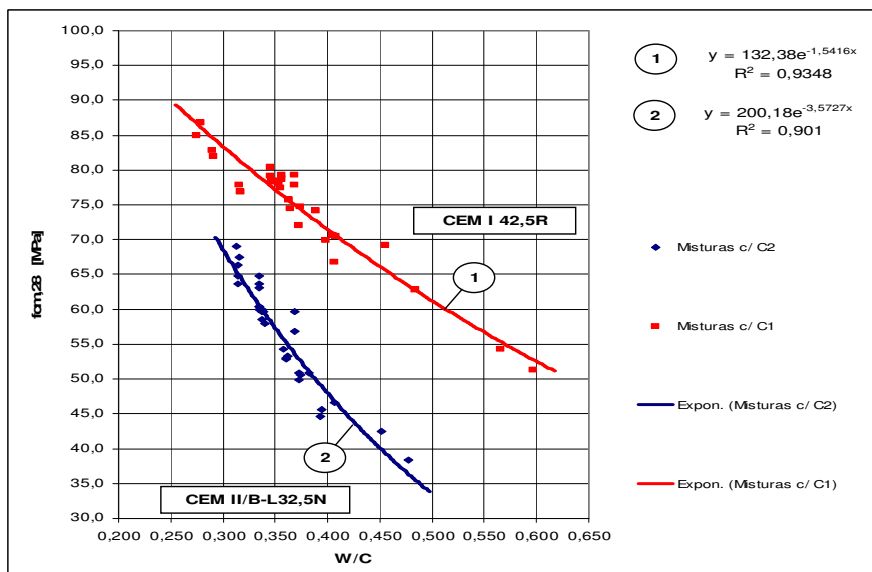


Figura 2.15- Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão W/C [27]

Para a definição da argamassa será necessário adotar um valor para a razão volumétrica (V_p/V_s). O valor de (V_p/V_s) poderá variar entre 0,60 e 0,80.

Definido (V_p/V_s) e conhecido o valor da razão W/C da argamassa, determina-se a percentagem de substituição do cimento pela adição através das correlações ilustradas nas figuras 2.16 à Figura 2.21

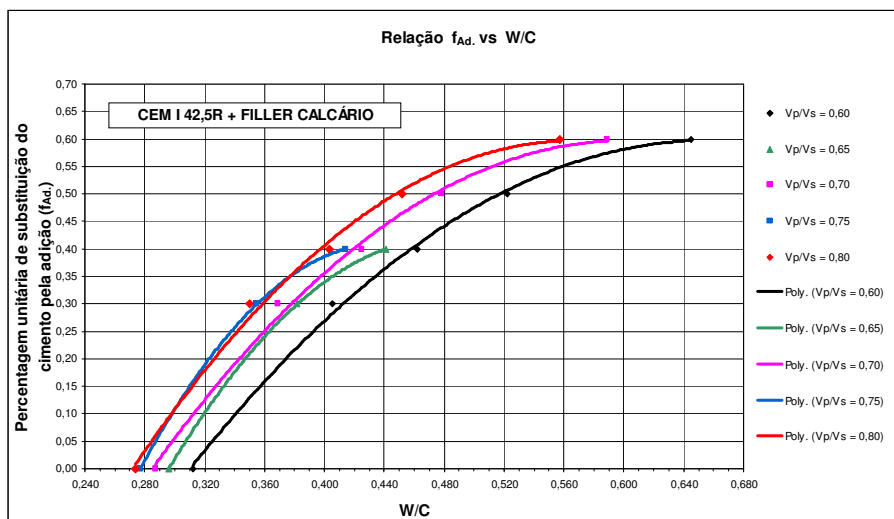


Figura 2.16- Relação $f_{Ad.}$ versus W/C para as famílias com CEM I 42,5R e filler calcário [27]

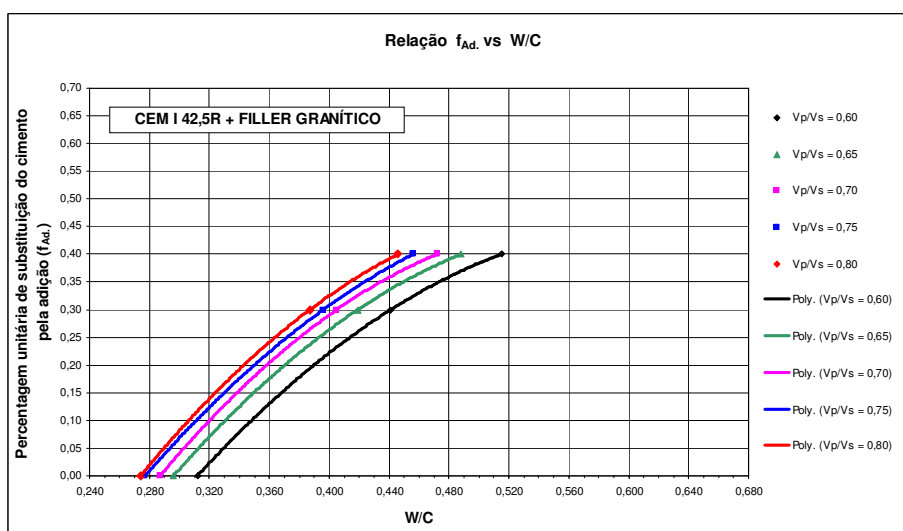


Figura 2.17- Relação $f_{Ad.}$ versus W/C para as famílias com CEM I 42,5R e filler granítico [27]

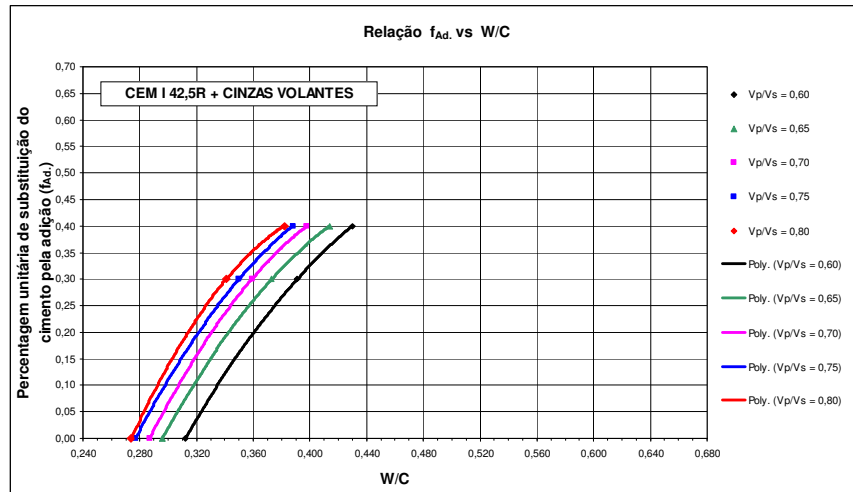


Figura 2.18- Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM I 42,5R e cinzas volantes [27]

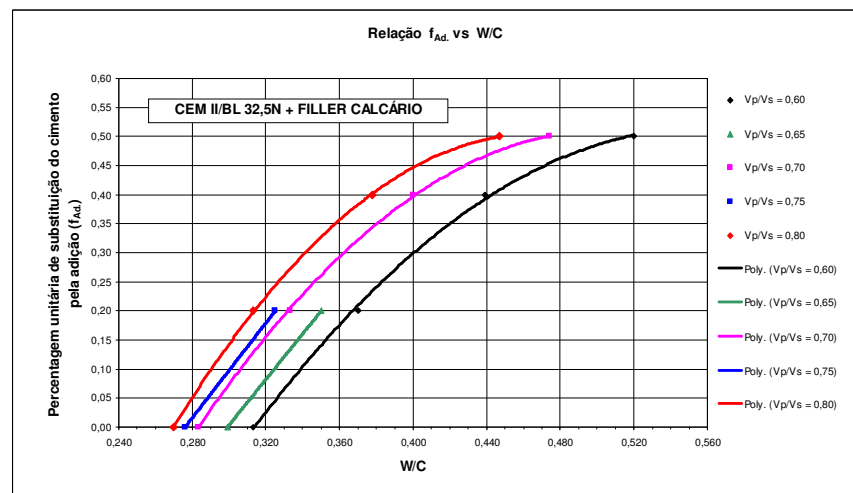


Figura 2.19- Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM II/B-L32,5N e filler calcário [27]

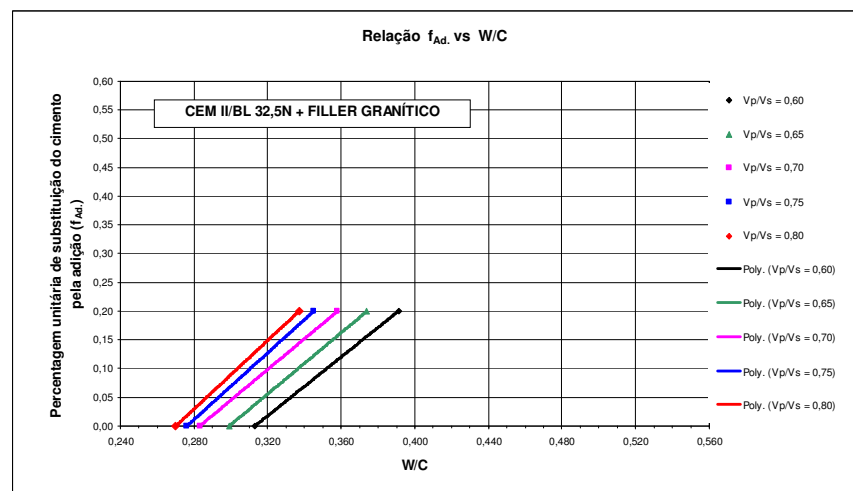


Figura 2.20- Relação f_{Ad} vs W/C para as famílias com CEM II/B-L32,5N e filler granítico [27]

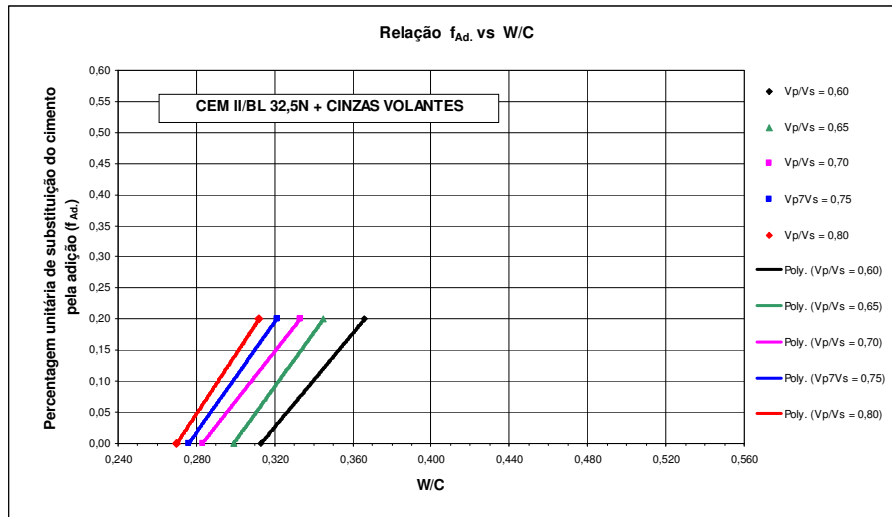


Figura 2.21- Relação $f_{Ad.}$ vs W/C para famílias com CEM II/B-L32,5N e cinzas volantes [27]

Uma vez definidos os parâmetros (V_p/V_s), a “família de finos” e as frações volumétricas das areias que conduzem à curva de referência estabelecida, procede-se à determinação experimental dos valores de (V_w/V_p) e ($S_p/p\%$) que conduzem às propriedades reológicas pretendidas.

Como ponto de partida, os valores de (V_w/V_p) e ($S_p/p\%$) poderão ser estimados a partir das correlações ilustradas nas figuras 2.22 a 2.25.

A argamassa calculada com base nos parâmetros iniciais é ensaiada em laboratório para determinar os parâmetros reológicos G_m e R_m , utilizando, respectivamente, o ensaio de espalhamento e o ensaio de fluidez (Funil-V).

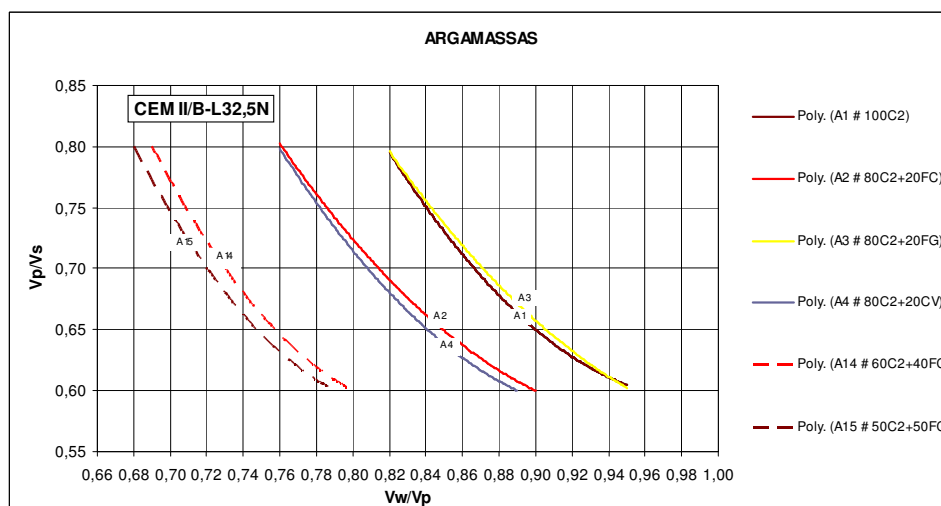


Figura 2.22- Relação V_p/V_s versus V_w/V_p para as famílias com CEM II/B-L32,5N [27]

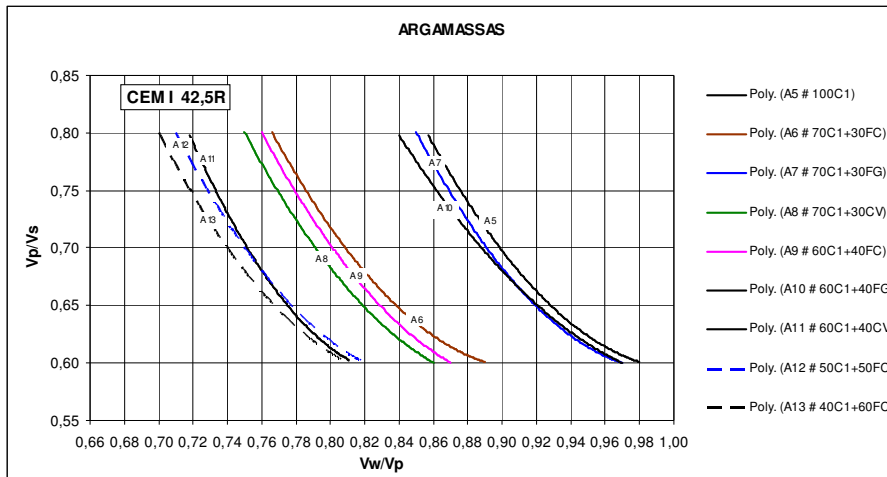


Figura 2.23- Relação V_p/V_s versus V_w/V_p para as famílias com CEM I 42,5R [27]

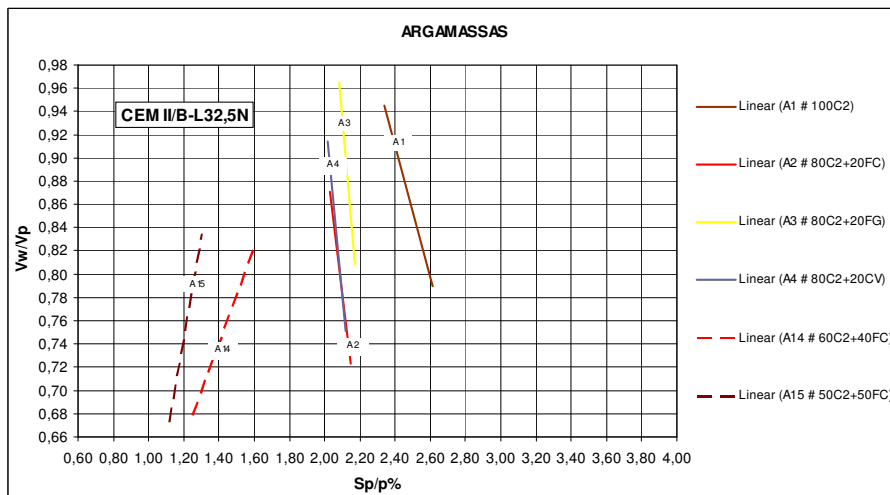


Figura 2.24- Relação V_w/V_p versus $Sp/p\%$ para as famílias com CEM II/B-L32,5N [27]

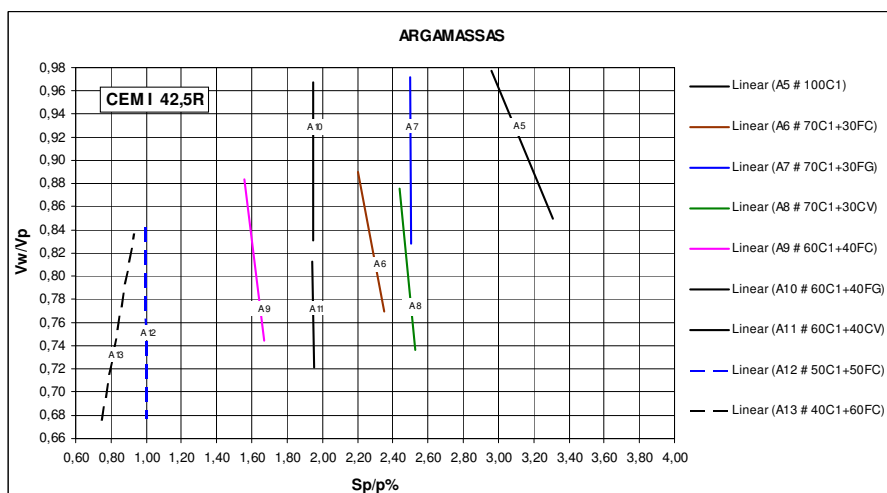


Figura 2.25- Relação V_w/V_p versus $Sp/p\%$ para as famílias com CEM I 42,5R [27]

2.1.7.3.4 Cálculo das argamassas

Assumindo como unidade de volume o m^3 , a fórmula fundamental do cálculo das argamassas assume a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} + V_v = 1,0$$

(Equação 2.3)

Onde:

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 ,

Desprezando a contribuição do volume de vazios resulta:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} = 1,0$$

(Equação 2.4)

Ou seja

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

(Equação 2.5)

Deste modo obtêm-se as seguintes expressões:

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

(Equação 2.6)

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

(Equação 2.7)

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

(Equação 2.8)

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

(Equação 2.9)

Note-se ainda que:

$$\frac{V_{sp}}{V_p} = \left(\frac{Sp}{p} \right) \times \frac{\delta}{\delta_{sp}}$$

(Equação 2.10)

Onde:

$$\delta_p = \Sigma (\text{Percentagem do fino } i \times \text{massa volúmica do fino})$$

(Equação 2.11)

e

$$\frac{Sp}{p} = \left(\frac{Sp}{p} \% \right) / 100$$

(Equação 2.12)

Uma vez conhecido o valor de V_p , podem ser determinadas as dosagens dos materiais finos (V_i) a partir da seguinte expressão:

$$V_i = \text{Percentagem de finos } i \times V_p$$

(Equação 2.13)

Da mesma forma, conhecido o valor de V_s podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados finos a partir da seguinte expressão:

$$V_{si} = (\text{percentagem unitária do agregado fino } i) \times V_s$$

(Equação 2.14)

Uma vez conhecidas todas as dosagens em volume absoluto, a sua conversão para valores em massa é feita a partir das massas volúmicas respectivas. Os resultados assim obtidos referem-se a dosagens por metro cúbico de argamassa.

2.1.7.3.5 Procedimento de amassadura

O método propõe o procedimento de mistura ilustrado na figura 2.26. Para evitar que a mistura seja projectada do recipiente da misturadora, o que sucede sempre que a mistura é excessivamente seca, é necessário prever uma paragem para limpeza das pás da misturadora de modo a obter garantias de uma mistura homogénea.

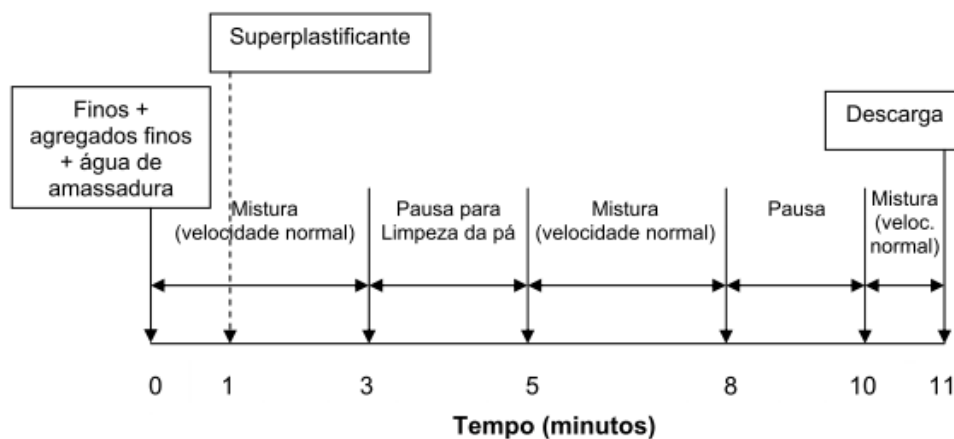


Figura 2.26- Procedimento de mistura [27]

2.1.7.3.6 Ensaios de argamassa

Devido ao seu elevado custo, poucos laboratórios dispõem de reómetros para avaliar a reologia do betão e, por outro lado, estes equipamentos têm-se mostrado pouco expeditos para uso generalizado. Como forma de solucionar esse problema têm sido propostos dois equipamentos alternativos que permitem medir parâmetros estreitamente relacionados com os parâmetros reológicos medidos pelo reómetro. Neste caso a tensão de corte está relacionada com a deformabilidade medida através do diâmetro de espalhamento de um tronco cónico de argamassa (figura 2.27), enquanto a viscosidade plástica está relacionada com a fluidez medida pelo tempo de escoamento deste material num funil de faces planas (figura 2.28).

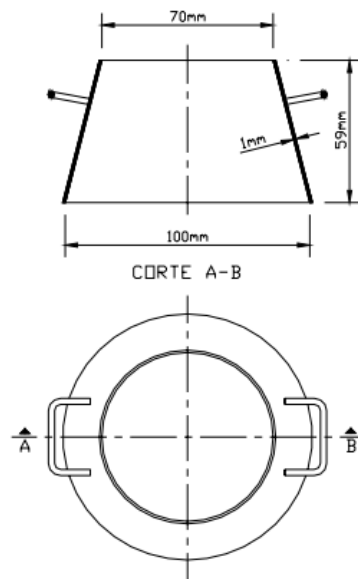


Figura 2.27- Cone para o ensaio de espalhamento em argamassas [27]

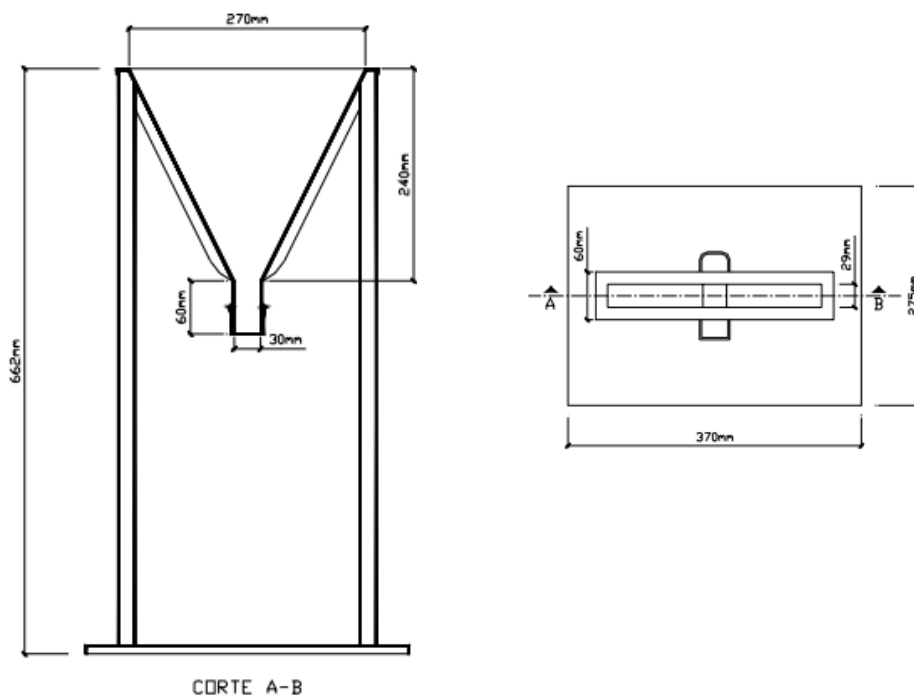


Figura 2.28- Funil-V para o ensaio de fluidez das argamassas [27].

2.1.7.3.7 Comportamento reológico

Este método estabelece um valor de G_m (Equação 15) que varia de 5,3 a 5,9 e um valor de R_m (Equação 16) que varia de 1,14 a 1,30, o que equivale, respectivamente, a uma variação do diâmetro médio de espalhamento entre 251 e os 263 mm e uma variação do tempo de escoamento entre os 7,69 e os 8,77 segundos.

$$Gm = \left(\frac{Dm}{D0}\right)^2 - 1$$

(Equação 2.15)

Onde:

Gm é a área de espalhamento relativa;

Dm é o diâmetro médio de espalhamento, em mm;

D0 é o diâmetro inicial na base do cone, em mm.

$$Rm = \left(\frac{10}{t}\right)$$

Equação 2.16)

Onde:

Rm é a velocidade relativa de escoamento, em s⁻¹

t é o tempo de escoamento, em segundos.

2.1.7.3.8 Procedimento de o acerto da reologia das misturas

A figura 2.29 ilustra, em termos esquemáticos, as alterações induzidas nas propriedades reológicas das argamassas quando se aumenta Vw/Vp mantendo-se constante o valor de Sp/p%. Da mesma forma, a Figura 2.30 ilustra essas alterações quando se aumenta Sp/p%, mantendo-se constante Vw/Vp. A conjugação destes dois comportamentos permite fazer uma aproximação sucessiva aos valores pretendidos.

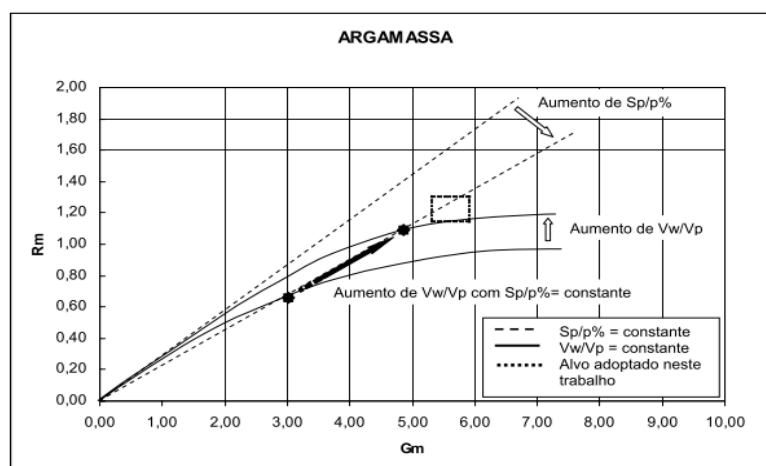


Figura 2.29- Alterações na reologia com o aumento de Vw/Vp mantendo Sp/p% constante [27]

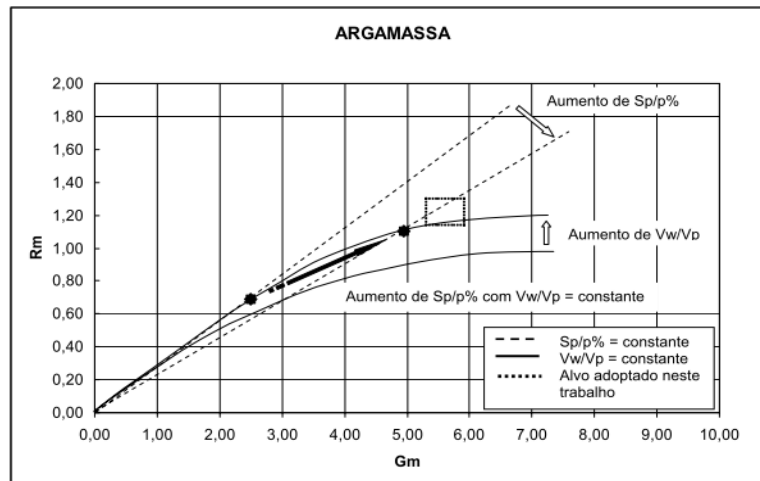


Figura 2.30- Alterações na reologia com o aumento de Sp/p% mantendo Vw/Vp constante [27]

Uma vez definidos os parâmetros da argamassa, o estudo da composição do betão completa-se com a definição do volume de vazios (V_v) e da razão (V_m/V_g). O volume de vazios assume um valor constante da ordem de $V_v=0,030 \text{ m}^3$, enquanto que o parâmetro (V_m/V_g) é determinado em função do grau de auto-compactabilidade desejado.

O grau de auto-compactabilidade pode ser inferido, alternativamente, a partir do parâmetro (H_2/H_1), medido no ensaio da “Caixa-L”. Para um valor de $H_2/H_1 = 0,80$ e um diâmetro de espalhamento $D_m = 630 \text{ mm}$, o parâmetro (MN) deverá assumir um valor igual ou superior a 1,70. No limite, isto significa que $[(V_p/V_s) \times (V_m/V_g) = 1,70]$, ou seja: $V_m/V_g \geq 1,7 (V_p/V_s)$. A relação entre os parâmetros (H_2/H_1) e (MN) é ilustrada na Figura 2.31.

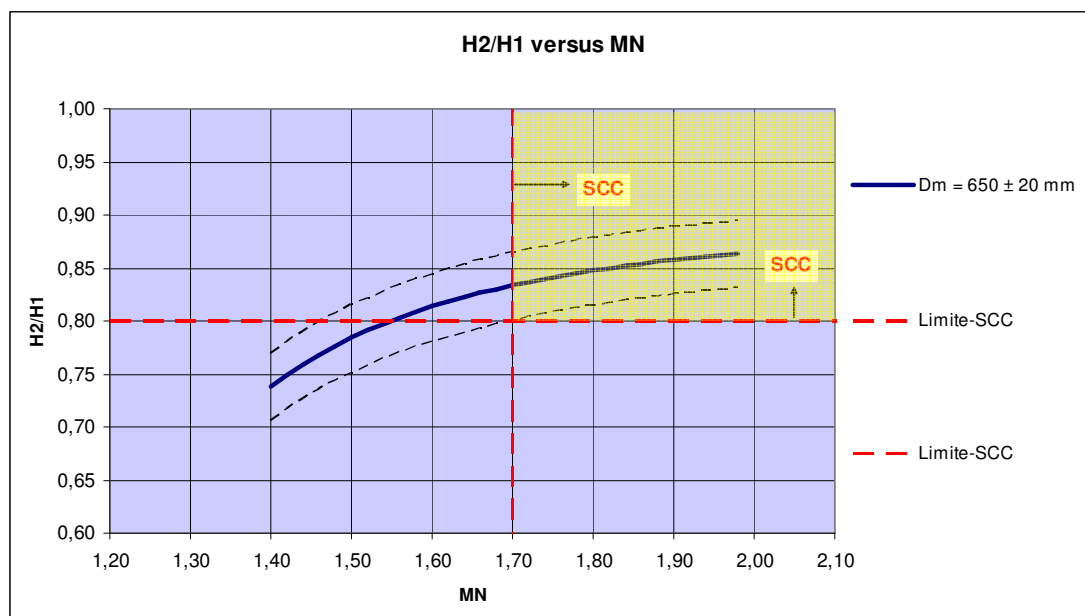


Figura 2.31 Relação entre MN e H2/H1 [27].

2.1.7.3.9 Cálculo dos betões

O volume de vazios (V_v) assume um valor constante de $0,030 \text{ m}^3$ por metro cúbico de betão.

Assumindo como unidade de volume o m^3 , a fórmula fundamental do cálculo dos betões assume a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} + V_v = 1,0$$

(Equação 2.17)

Onde:

V_p é o volume absoluto de materiais finos em m^3 / m^3 ,

V_w é o volume absoluto 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 absoluto de superplastificante em m^3 / m^3 ,

V_v é o volume absoluto de vazios em m^3 / m^3 ,

Considerando:

$$V_m = 1 - V_g - V_v$$

(Equação 2.18)

Da fórmula fundamental resulta a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp}$$

(Equação 2.19)

Ou seja:

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

(Equação 2.20)

Onde:

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

(Equação 2.21)

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

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

(Equação 2.22)

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

(Equação 2.23)

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

(Equação 2.24)

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

(Equação 2.25)

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

(Equação 2.26)

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

(Equação 2.27)

Note-se ainda que:

$$\left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) = \left(\frac{S_p}{p}\right) \times \frac{\delta p}{\delta s_p}$$

(Equação 2.28)

Onde:

$$\delta_p = \Sigma (\text{Percentagem do fino } i \times \text{massa volúmica do fino})$$

(Equação 2.29)

e

$$\left(\frac{Sp}{p}\right) = \left(\frac{Sp}{p}\% \right) / 100$$

(Equação 2.30)

Uma vez conhecido o valor de V_p , podem ser determinadas as dosagens dos materiais finos (V_i) a partir da seguinte expressão:

$$V_i = \text{Percentagem do fino } i \times V_p$$

(Equação 2.31)

Da mesma forma, conhecido o valor de V_s podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados finos a partir da seguinte expressão:

$$V_{si} = \text{percentagem unitária do agregado fino } i \times V_s$$

(Equação 2.32)

Conhecido ainda o valor de V_g podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados grossos a partir da seguinte expressão:

$$V_{gi} = \text{percentagem unitária do agregado grosso } i \times V_g$$

(Equação 2.33)

2.1.7.3.10 Procedimentos de amassadura

Com o objectivo de minimizar as alterações ao comportamento das argamassas estudadas na fase anterior, a sequência de amassadura dos betões auto-compactáveis deve reproduzir, tanto quanto possível, a sequência de amassadura utilizada nas argamassas. A Figura 2.32 ilustra esquematicamente a sequência de amassadura proposta para os betões. Em comparação com o procedimento adoptado nas argamassas, pode referir-se que apenas foi excluída a paragem para limpeza das pás.

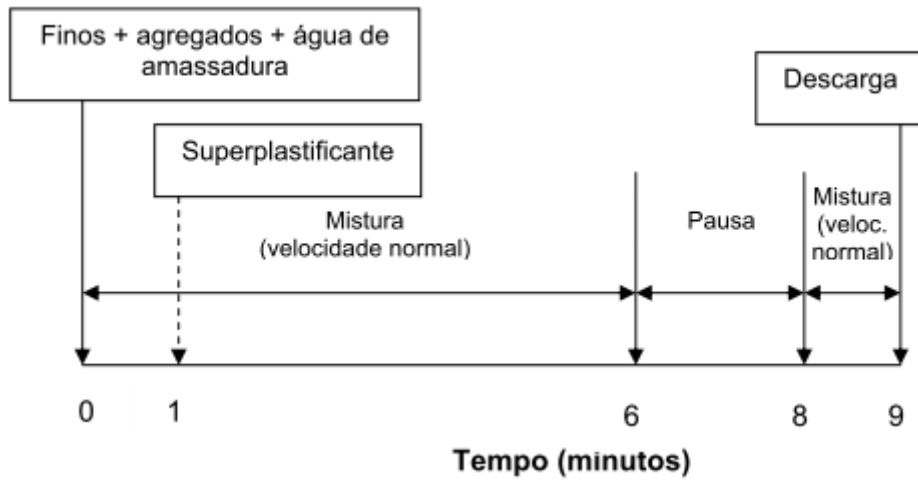


Figura 2.32- Sequência de amassadura adotada para os betões [27].

2.1.7.3.11 Ensaios em betões

Os ensaios presentes neste método são o ensaio de espalhamento, ilustrado na figura 2.33, o ensaio de fluidez ilustrado na figura 2.34 e o ensaio da “Caixa-L”, que é apresentado na figura 2.35.

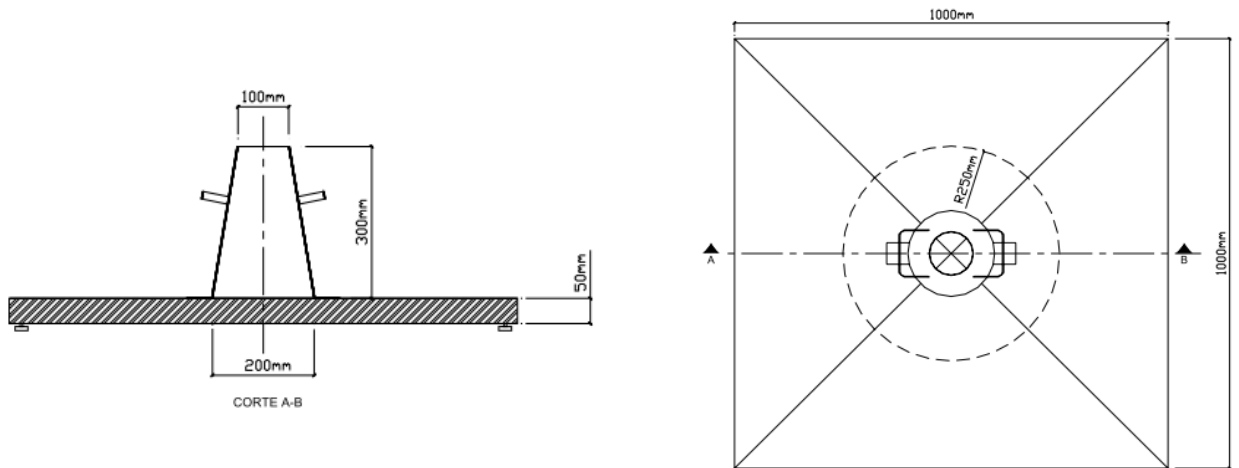


Figura 2.33- Ensaio de espalhamento para o betão [27]

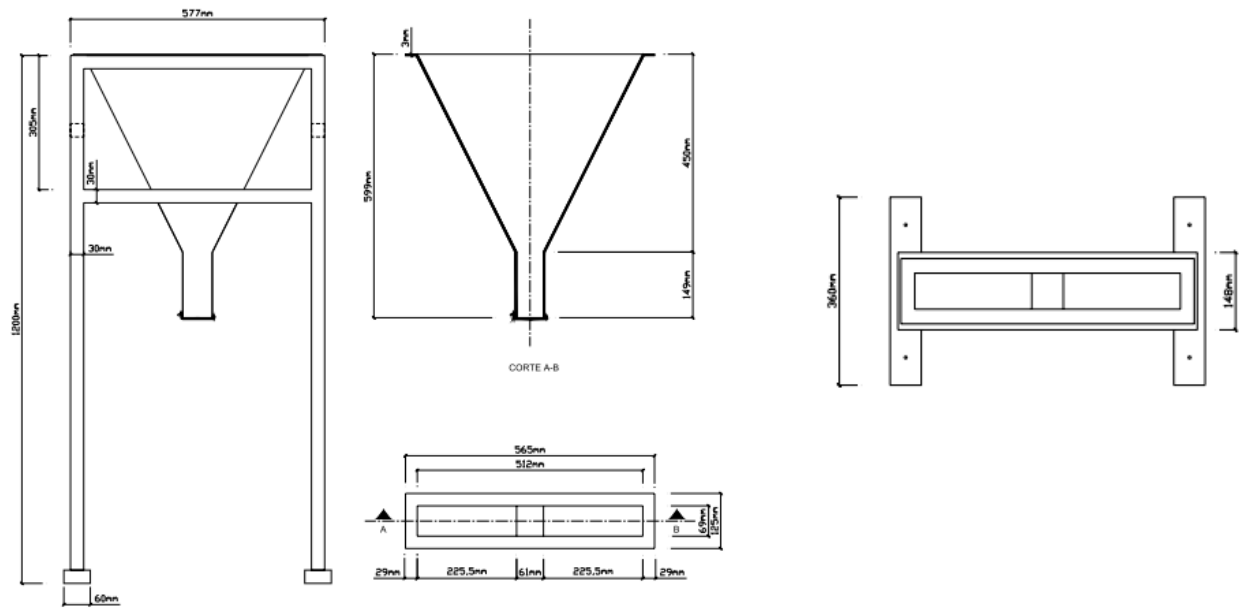


Figura 2.34- Funil-V para o ensaio de fluidez do betão [27]

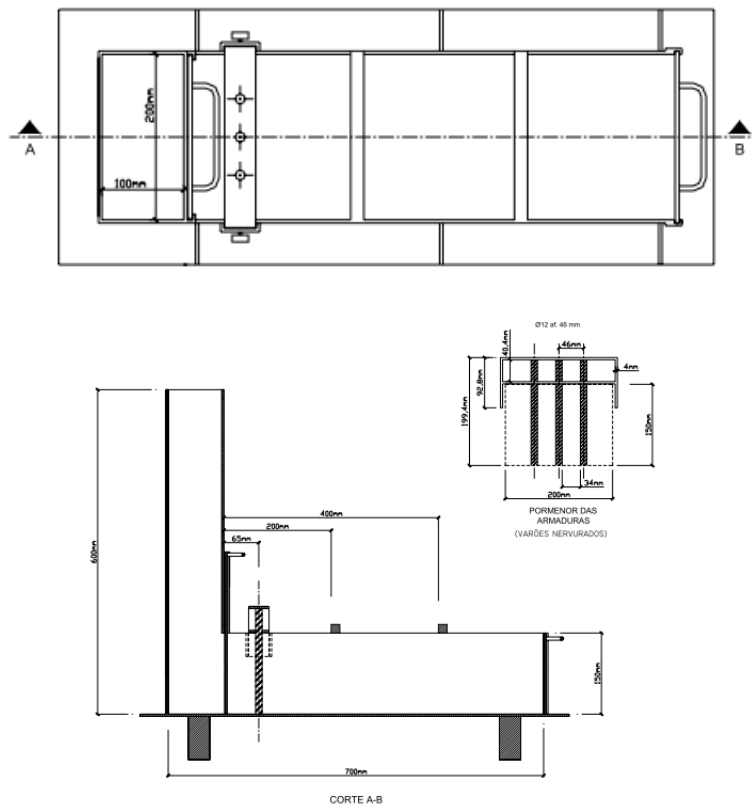


Figura 2.35- Caixa-L para o ensaio de auto-compactabilidade do betão [27]

2.1.7.3.12 Comportamento reológico pretendido

O método propõe os valores de G_c (Equação 34) entre 8,00 e 11,25 e os valores de R_c (Equação 35) entre 0,50 e 1,00. Os restantes ensaios das propriedades do betão fresco só deveram prosseguir se esta primeira premissa relativamente a G_c e R_c for satisfeita.

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

(Equação 34)

Onde:

G_c é a área de espalhamento relativa do betão;

D_m é o diâmetro médio de espalhamento, em mm;

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

$$R_c = \left(\frac{10}{t}\right)$$

(Equação 34)

Onde:

R_c é a velocidade relativa de escoamento do betão, expressa em s^{-1} ;

t é o tempo de escoamento, expresso em segundos.

2.1.7.3.13 Procedimento de acerto da reologia das misturas

Sempre que se verificar um valor do diâmetro médio de espalhamento inferior a 600 mm, procede-se a um ligeiro acréscimo de água ou superplastificante na mistura.

As correcções acima referidas só serão consideradas admissíveis se forem suficientemente pequenas. Estas correcções serão consideradas suficientemente pequenas se as quantidades de água e/ou superplastificante adicionadas ou subtraídas à mistura não provocarem alterações superiores a 0,02 nas razões água/cimento ou água/(materiais cimentícios), ambas expressas em massa.

2.2 Resíduos de construção e demolição

2.2.1 Definição

Segundo Hood (2006) [20], o RCD é todo material oriundo de actividades de demolição de obras civis, restos de obras ou reparações. Esta definição também é aceite por Angulo (2000) [2], e

complementada, afirmando este ser todo e qualquer resíduo oriundo das actividades de construção, seja ele de novas construções, reparações, demolições, que envolvam actividades de obras de arte, solos ou resíduos de vegetação presentes nas limpezas de terreno.

Quanto à terminologia dentro do meio científico, os resíduos de construção e demolição são definidos como RCD, porém, o termo entulho também é utilizado [2,20]. De acordo com Angulo (2000) [2], esta divergência deve-se às fracções de materiais presentes e às actividades geradoras destes materiais.

2.2.2 Consequências ambientais da deposição de RCD

Apesar da construção civil ser uma actividade antiquíssima, tendo sempre associada à sua actividade a produção de resíduos, só nas últimas décadas as preocupações sobre a gestão desses mesmos resíduos têm começado a aparecer, assim como as tentativas de minimizar este problema.

É inegável que a redução dos detritos é um assunto de enorme importância devido às razões económicas e ambientais que deles advêm, tais como o consumo de recursos naturais, o consumo de energia e a poluição inerentes à produção de materiais, fazendo com que sejam efectuados estudos e implementadas medidas, visando orientar e melhorar a gestão dos resíduos [32].

Começa então a surgir uma consciência ambiental. Tal tomada de consciência não surgiu mais cedo porque a composição dos RCD, sendo fundamentalmente de materiais inertes, não gera preocupações de contaminação por lixiviação, propagação de matérias tóxicas ou inconvenientes de putrefacção de matérias orgânicas como acontece no caso dos resíduos sólidos urbanos [21].

Segundo Hood (2006) [20], a Alemanha, com uma população de 82,5 milhões de habitantes, produz anualmente 225.753 toneladas de RCD, ou seja, 2.736 kg/hab.ano. Contudo, esta estimativa não retrata com precisão o que se passa na Europa, porque segundo o mesmo estudo, esta média situa-se nos 1.126 kg/hab.ano na Europa dos 25.

2.2.3 Processamento dos RCD

2.2.3.1 Tipos de demolição

Tendo várias origens, os RCD podem ter também vários trajectos de processamento. No que toca a resíduos de demolição, este processo começa na escolha do tipo de demolição.

É fácil depreender que a demolição selectiva tem um papel fundamental para que os materiais provenientes de demolição cheguem nas condições apropriadas às estações de reciclagem. Através da demolição selectiva, a separação dos resíduos é feita de uma forma sistemática, tornando o seu encaminhamento mais eficiente, originando menores quantidades de resíduos depositados em aterros [17].

Em Portugal, os processos de demolição assentam na destruição simultânea de toda a edificação, resultando o resíduo bastante heterogéneo. Contudo, segundo Gonçalves (2007) [13], o caso português terá maior tendência a banalizar a demolição selectiva do que a demolição com uso controlado de explosivos e como tal poderá, com a ajuda de alguma sensibilização dos empreiteiros ou alguma novidade na legislação, catapultar a demolição selectiva para um processo vulgar e, com isto, proporcionar bases para que se torne cada vez mais sustentável a reutilização dos RCD.

2.2.3.2 Centrais de reciclagem

Os processos de produção dos agregados reciclados realizam-se em centrais de tratamento que são similares aos utilizados na produção de agregados naturais. A maior diferença está no facto de incorporarem elementos específicos necessários à separação de impurezas e outros contaminantes. Estas centrais podem classificar-se segundo a sua capacidade de produção em: centrais fixas (600 toneladas/h ou mais) e centrais móveis (120 a 200 toneladas/h) [38].

As centrais móveis podem ser instaladas no local da demolição e têm geralmente uma entrada única de alimentação, uma cinta transportadora, uma britadeira e um ou dois peneiros diferentes.

De acordo com CAIRNS et al. (1998) [3], as principais vantagens deste tipo de estação são:

- Custos menores do que os das centrais fixas, em cerca de 5 %;
- Menor tempo de instalação;
- Redução dos custos de transporte do material de demolição.

As centrais fixas, que constituem a maioria das existentes, são instalações permanentes com elementos transportadores e vários peneiros, possuindo frequentemente dois tipos de britadeiras. Os RCD são transportados até estas centrais.

De acordo com CAIRNS et al. (1998) [3], as principais vantagens deste tipo de central de reciclagem são:

- Possibilidade de obtenção de produtos reciclados mais diversificados e de melhor qualidade do que os produzidos pelas unidades móveis;
- Possibilidade de utilização de equipamentos maiores e mais potentes que possibilitam melhor processo de britagem, separação de impurezas e crivagem do que os equipamentos utilizados em centrais móveis.

A implantação da central de reciclagem é muito importante, podendo ditar a viabilidade económica do investimento. Segundo LEITE (2001) [23], para que exista um correcto dimensionamento da central, devem ser estudados e estimados os seguintes factores:

- Volume de RCD passível de ser reciclado;

- Tipo de material e objectivo de aplicação;
- Local de instalação da central de reciclagem.

Segundo Gonçalves (2007) [17], na Holanda, onde a produção de agregados reciclados é vulgar, utilizam na maioria dos casos uma combinação de dois tipos de britadeiras, a britadeira de impacto e a de mandíbulas. Como trituração primária, as britadeiras de mandíbulas são as escolhidas, devido à sua elevada capacidade de processamento e baixo custo, enquanto que as britadeiras de impacto são utilizadas como trituração secundária, de modo a produzir agregados de melhor qualidade, mais regulares e com menos pasta aderida.

2.2.4 Regulamentação existente

O LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) elaborou, em Maio de 2006, a pré-norma prE 469 “*Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*” [17,11]. Posteriormente, em Setembro de 2006, publicou a versão final do documento, a E 471 “*Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*”, que classifica os agregados grossos reciclados abrangidos pela NP EN 12620 em “*Agregados para betão*” e estabelece os requisitos mínimos que deverão respeitar para poderem ser utilizados no fabrico de betão de ligantes hidráulicos.

Nesta especificação do LNEC não são apresentadas exigências para os agregados reciclados finos nem regras para a sua aplicação, por possuírem, em geral, uma elevada percentagem de elementos com dimensão inferior a 0,063 mm e uma maior absorção de água, dificultando o controlo da trabalhabilidade e comprometendo a resistência mecânica do betão.

A Especificação LNEC estabelece três classes de agregados provenientes de resíduos de construção e demolição [11]:

- ARB1 e ARB2 - constituídas maioritariamente por betão, misturado ou não com agregados não ligados;
- ARC - que tem como principais constituintes o betão, os agregados não ligados e os elementos de alvenaria, não havendo exigências quanto às percentagens relativas de cada um deles.

O Quadro 2.3 indica a composição a que cada tipo de agregado deve obedecer, enquanto que os seus requisitos são apresentados no Quadro 2.4.

Quadro 2.3- Composição dos agregados reciclados [17]

Constituintes	ARB1	ARB2	ARC
Betão (%)	90	70	90
Agregados não ligados (%)			
Alvenaria (%)			
Materiais betuminosos (%)	5	5	10
Partículas leves ^a (%)	1	1	1
Outros materiais ^b	0,2	0,5	1

^a material com massa volúmica inferior a 1000 kg/m³ ; no caso das partículas leves serem constituintes minerais não prejudiciais para o betão nem para o acabamento superficial, o limite estabelecido pode atingir 3%;

^b vidro, solos argilosos, plásticos, borrachas, metais e matérias putrescíveis.

Quadro 2.4- Requisitos dos agregados [17].

Requisitos	ARB1	ARB2	ARC
Massa volúmica (kg/m ³)	≥2200		≥2000
Absorção de água (%)	≤7		≤7
Teor em finos (%)	≤4		≤3
Teor de sulfatos solúveis em ácido (%)	≤0,8		≤0,8

Como se pode ver no quadro 2.4, os agregados classificados como ARB1 e ARB2 têm os mesmos requisitos de massa volúmica e absorção de água, e de acordo com Gonçalves (2007) [17], dadas as diferenças de composição entre os dois, será previsível que a classe ARB1 terá mais facilidade em cumprir estes requisitos, ou que, para cumprir estes requisitos, a composição do conjunto de RCD se aproxime com mais frequência da classe ARB1. O mesmo autor espera que os ARB2 tenham dificuldade em preencher estes requisitos caso, tanto o betão como a alvenaria, tenham nos seus constituintes uma quantidade significativa de argamassa, pois numa situação (padrão), em que a massa volúmica dos agregados de betão ronda os 2300 kg/m³ e a dos agregados de alvenaria os 2000 kg/m³, qualquer um destes tipos de agregados cumprirá as exigências requeridas.

Quanto à classe de agregados ARC, os requisitos são bastante exigentes, tendo em conta o tipo de utilização proposta. No entanto, de acordo com Gonçalves (2007) [17], apenas haverá dificuldade em respeitar o limite de 2000 kg/m³ caso a composição dos agregados seja exclusivamente constituída por alvenaria.

É ainda de notar que os ARC e os ARB têm o mesmo teor máximo de absorção de água. Este facto pode provocar uma maior dificuldade do cumprimento dos requisitos para os ARC, dado que de acordo com Gonçalves (2007) [17], com a massa volúmica mínima associada a esta classe de agregados, é expectável que os agregados tenham uma absorção de água a rondar 10%.

Os agregados de classes ARB1 e ARB2 podem ser utilizados no fabrico de betão para aplicação em betão armado estrutural. Para aplicação em betão armado, a proporção máxima de agregados reciclados de betão, no conjunto dos agregados, é de 25% para os agregados da classe ARB1 e de 20% para os agregados da classe ARB2. Para betão simples, de enchimento ou regularização, a percentagem de substituição pode ser total, desde que o betão seja aplicado em ambientes não agressivos. Tanto a classe máxima de resistência como as condições ambientais permitidas estão dispostas no Quadro 2.5 [11].

Quadro 2.5- Classes de resistência e de exposição ambiental permitidas [17]

Classe do agregado	Classe de resistência	Percentagem de incorporação	Classe de exposição ambiental
ARB1	C 40/50	25%	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1,
ARB2	C 35/45	20%	XA1 ^a

^a em fundações.

A taxa de substituição de agregados naturais por reciclados é limitada pelo documento de modo a evitar grandes variações do módulo de elasticidade, fluência, retracção e durabilidade. Para aplicações em betão armado a proporção máxima de agregados reciclados de betão, no conjunto dos agregados, é de 25% para os agregados da classe ARB1 e de 20% para os agregados da classe ARB2. Quanto à utilização de agregados reciclados da classe, ARC, esta só é permitida em betões de enchimento ou de regularização, sem qualquer função estrutural, e em ambientes não agressivos [11]. No entanto, é autorizada a utilização de percentagens superiores de agregados reciclados, desde que sejam realizados estudos específicos que avaliem a sua influência nas propriedades relevantes à aplicação considerada [11].

2.2.5 Aplicação dos RCD

2.2.5.1 Argamassas

A fracção fina dos agregados reciclados é bastante significativa no panorama geral dos RCD, pois durante o processo de britagem, mesmo quando o objectivo é a produção de agregados grossos, existe uma quantidade significativa de agregados finos produzida.

Dado que a fracção fina dos agregados reciclados influencia negativamente as propriedades do betão segundo Gonçalves (2007) [17], as argamassas apresentam-se como a solução mais óbvia para

utilização da fracção fina dos RCD, pois as argamassas com agregados reciclados apresentam características que as tornam adequadas à utilização na construção, mesmo tendo em conta que algumas propriedades são melhores e outras piores quando comparadas com argamassas convencionais.

As argamassas podem ser utilizadas como revestimento ou assentamento [17]. O primeiro caso pode ser mais problemático, devido às grandes variações de composição, distribuição granulométrica ou existência de contaminantes nos agregados reciclados, sendo preciso para este caso um controlo mais apertado para a sua utilização.

2.2.5.2 Pavimentos rodoviários

A utilização de RCD na construção de pavimentos rodoviários, nomeadamente em camadas de base e sub-base, é a forma mais simples e económica de aplicação dos materiais reciclados. Não exige um elevado controlo a nível granulométrico e permite reduções importantes no custo da produção dos agregados, por ter uma menor necessidade de selecção [36].

No domínio das estradas, os finos podem ser usados para várias funções, nomeadamente, como estabilizantes nas bases dos pavimentos rodoviários, na absorção de manchas de óleo existentes no pavimento ou mesmo para regular a acidez dos solos através da elevada alcalinidade do betão.

2.2.5.3 Sistemas de drenagem

Os RCD podem ainda ser empregues em camadas drenantes, com diversas funções [17]:

- Camada drenante em aterro de resíduos sólidos,
- Elementos de filtro em fossas sépticas,
- Drenos em trincheiras e valas subterrâneas.

A grande porosidade encontrada em RCD de granulometria mais grossa traduz-se numa elevada capacidade de absorção de água, tornando-se numa vantagem em áreas com dificuldade de escoamento.

2.2.5.4 Betão

A utilização de agregados reciclados em betão é uma forma de se tirar maior proveito económico dos RCD e tem sido objecto de estudo ao longo dos anos.

Segundo Gonçalves (2007) [17], o betão produzido com agregados reciclados tem características diferentes das do betão convencional, diferenças estas muito dependentes do tipo e qualidade dos agregados utilizados. Pode-se então obter betão sem funções estruturais, betões estruturais com classes de resistência ditas “normais” mas também se podem obter betões de alta resistência.

2.2.6 Utilização de agregados reciclados grossos no betão auto-compactável

A indústria da construção civil tem importante papel no desenvolvimento dos países. No entanto, esta provoca prejuízos ao meio ambiente, pois possui um alto consumo de recursos naturais, além de uma alta formação de resíduos. Como descrito nos capítulos anteriores, uma forma de aproveitamento destes resíduos é a reciclagem, transformando-os em agregados reciclados e reutilizando-os na própria construção civil. Por outro lado, o betão auto-compactável é um avanço na tecnologia dos materiais de construção, pois minimiza o tempo de betonagem, além de ruídos, mão-de-obra, entre outras vantagens já avaliadas. Entretanto, não se tem experiência do uso dos agregados reciclados na produção de BAC, uma vez que a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados pode gerar alterações em algumas propriedades.

Grdic et al [18] levaram a cabo um estudo, tendo em conta a utilização dos agregados reciclados grossos em betões auto-compactáveis. Para este estudo, no que toca ao material fino, utilizaram como ligante o cimento do tipo CEM II/B-M (S-Q) 42.5N e como adição, utilizaram uma adição do tipo I, o fíler calcário. Os agregados grossos reciclados foram obtidos, a partir da demolição de uma ponte com 40 anos de idade e os agregados naturais eram de origem fluvial. A distribuição granulométrica encontra-se representada no quadro 2.6. O adjuvante utilizado, foi um plastificante com base química de policarboxilatos modificado. A dosagem de plastificante foi de 0,7% em relação a dosagem de cimento e fíler calcário.

Quadro 2.6- Distribuição granulométrica dos agregados [18]

Percentage passing (%)	0/4 mm (river aggregate)	4/8 mm (river aggregate)	8/16 mm (river aggregate)	4/8 mm (recycled aggregate)	8/12 mm (recycled aggregate)
Botton	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.125	0.81	0.03	0.02	0.04	0.03
0.25	7.31	0.04	0.03	0.18	0.05
0.5	17.30	0.05	0.04	0.27	0.05
0.71	33.02	0.07	0.05	0.31	0.06
1	46.84	0.10	0.07	0.33	0.06
2	72.60	0.28	0.09	0.44	0.07
4	94.05	3.13	0.12	1.95	0.09
8	100.00	89.41	1.37	98.99	10.58
11.2	100.00	99.56	30.21	99.91	51.28
16	100.00	100.00	97.26	100.00	99.17
22.4	100.00	100.00	99.92	100.00	100.00
31.5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

No referido estudo, foram concebidos três tipos de betão: um betão de referência, feito apenas com o agregado natural, um betão designado de P50, com a incorporação de 50% de agregado grosso reciclado e um betão designado de P100, com a incorporação de 100% de agregado grosso reciclado. A quantidade dos componentes necessária para a produção de 1 m³ de betão foi constante, com excepção de pequenas variações na quantidade de água para manter a consistência igual, devido a alta absorção de água do agregado reciclado. As composições das misturas são descritas no quadro 2.7.

Quadro 2.7- Composições das misturas [18]

	E (mass for 1 m ³ (kg))	P50 (mass for 1 m ³ (kg))	P100 (mass for 1 m ³ (kg))
Limestone filler	260	260	260
Cement	409.6	409.6	409.6
Fraction 0-4 mm	676	676	676
Fraction 4-8 mm	426.6	429.6	429.6
Fraction 8-16 mm	426.6	429.6	429.6
Water	170	178	186
Superfluid M21M additive	4.0	4.0	4.0

Para o estudo do betão fresco Grdic et al [18], utilizaram o ensaio de espalhamento (figura 2.36) para medir a fluidez e viscosidade e a Caixa L (figura 2.37) para medir a capacidade de passagem do betão.

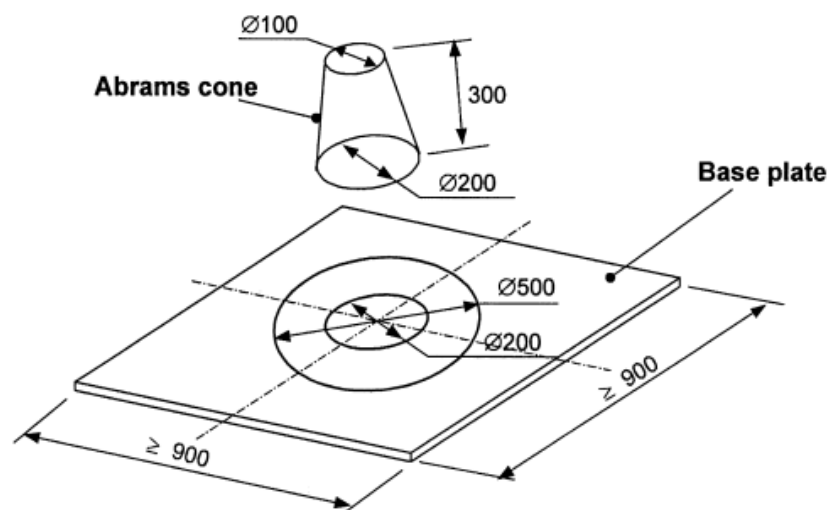


Figura 2.36- Ensaio de espalhamento [18]

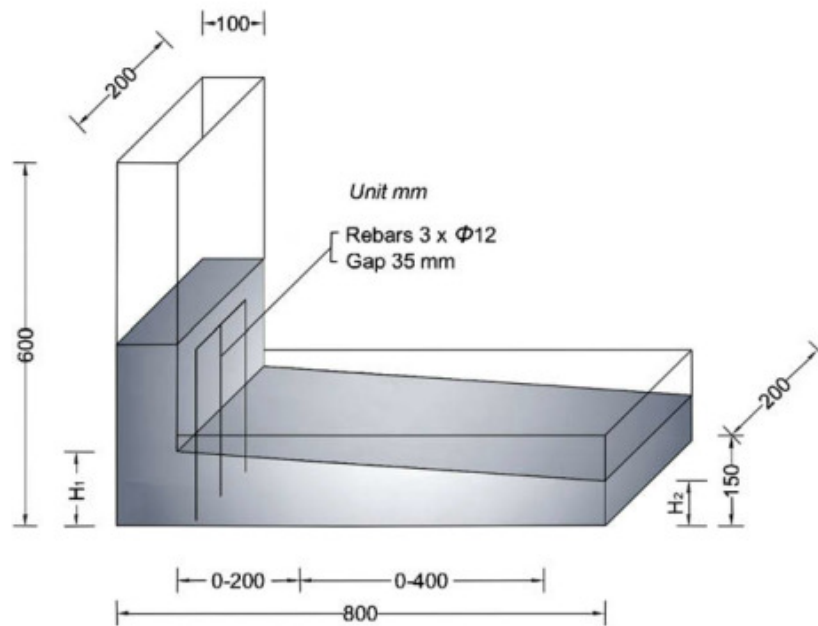


Figura 2.37- Ensaio da caixa L [18]

Como se inferir do quadro 2.8, os resultados entre os diferentes betões não diferem muito uns dos outros. A principal diferença é a perda de densidade com o aumento da incorporação de agregados reciclados, que pode ser explicada pela baixa densidade dos agregados grossos reciclados.

Quadro 2.8- Resumo dos ensaios em betão fresco [18]

Type of concrete	Density (kg/m ³)	Slump-flow test (cm)	T 500 (s)	L-box test	wc (water-cement factor)	wp (water-powder factor)
E	2391	73,5	5,60	0,94	0,41	0,25
P50	2366	73,5	5,40	0,95	0,43	0,26
P100	2355	72,5	6,00	0,98	0,45	0,27

O Betão em estado endurecido foi testado para avaliar a resistência à compressão, resistência a tracção e absorção de água.

No ensaio da resistência a compressão os provetes foram ensaiados aos 2, 7 e 28 dias. Os resultados obtidos estão reproduzidos na figura 2.38.

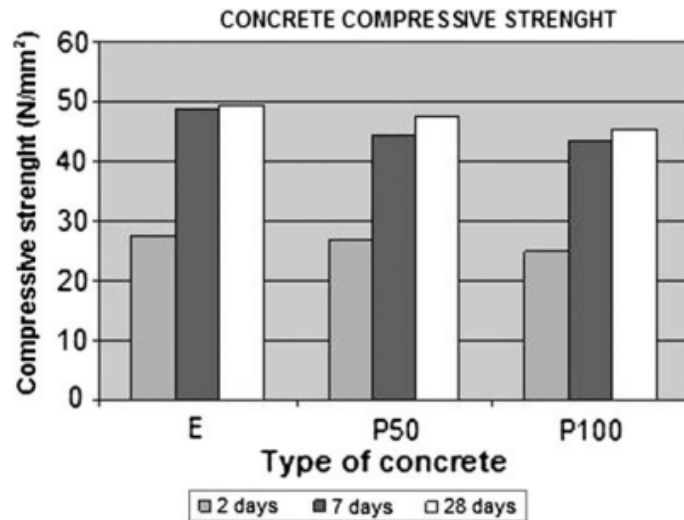


Figura 2.38- Ensaio de resistência a compressão [14]

Como se pode observar na figura 2.38, as diferenças não são muito significativas. De acordo com os autores do estudo o P50 e o P100 apresentam uma perda de resistências aos 28 dias de 3,88% e 8,55% respectivamente, em relação ao betão sem agregados reciclados. Esta perda de resistência é explicada pelo autores, através do facto de os agregados reciclados apresentarem uma inconsistente e irregular qualidade. Ao contrário do que acontece nos betões constituídos só com agregados naturais, onde a rotura ocorre na pasta de cimento, nos betões com agregados reciclados a rotura ocorre pelos agregados, visto serem o componente mais fraco da composição.

Em relação a resistência de tracção, de acordo com os autores do estudo, existem uma perda da resistência, aos 28 dias, dos provetes com incorporação de agregados reciclados, de 2,49% e 13,95% nos betões, P50 e P100 respectivamente. Como mostra a figura 2.39.

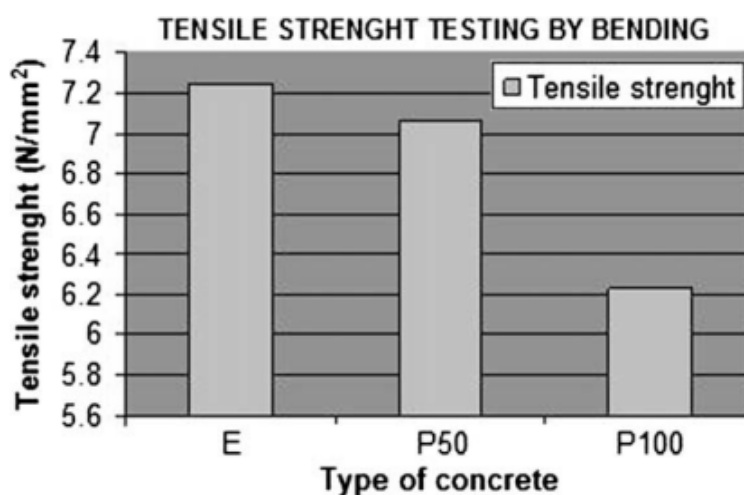


Figura 2.39- Ensaio de resistência a tracção [18].

Em relação a absorção de água os ensaios mostram que há um aumento nos betões com incorporação de 50% e de 100% de agregados reciclados, de cerca de 0,15 % e 0,37% em relação ao betão constituído somente com agregados naturais, como se pode ver na figura 2.40. A razão apontada pelos autores do estudo, é o facto de os agregados reciclados apresentarem uma absorção de água muito superior a dos agregados naturais e este facto pode ser explicado pela camada de betão que os agregados reciclados apresentam a sua volta.

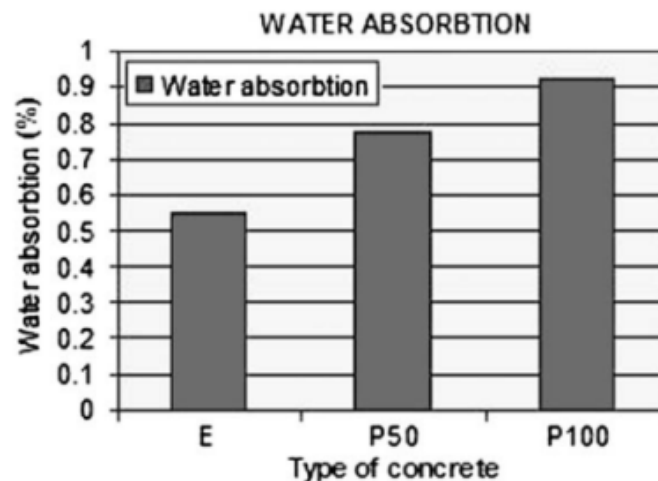


Figura 2.40- Ensaio de absorção de água [14]

No final do estudo, os autores concluíram que o uso de um agregado reciclado para produção de um BAC é justificado a partir de uma escolha adequada dos materiais e processo de mistura. Os autores, também chegaram à conclusão que podem ser obtidos betões de alto desempenho no que diz respeito à componente ambiental e propriedades mecânicas.

2.3 Conclusões

O BAC, desde o seu aparecimento, rapidamente se estendeu a todo o mundo devido as suas inúmeras vantagens quer a nível da melhoria da produtividade, ambiente de trabalho e homogeneidade do material colocado nas estruturas. Para se atingir a auto-compactabilidade, recorre-se usualmente a quantidades elevadas de finos, quando comparadas com o betão convencional. Em consequência, obtém-se normalmente um produto mais caro e com possibilidade de ocorrência de retracção e consequente fissuração, bem como um aumento do calor de hidratação.

Em regra geral, todos os materiais utilizados para produzir betões correntes vibrados e todas as recomendações quanto à conformidade desses materiais podem ser aplicadas ao betão auto-compactável. Sendo sempre fundamental uma análise de todos os constituinte.

No que diz respeito aos resíduos de construção e demolição, sabe-se que a construção civil tem uma importante representação mundial no consumo de recursos naturais, como no desenvolvimento de

impactos ambientais. Ela abrange desde a fabricação de cimento e suas emissões de gás na atmosfera até a eliminação de resíduos em aterros. Com a aproximação do conceito de desenvolvimento sustentável e a necessidade de novas relações da população com o meio ambiente, a construção civil deve passar por importantes transformações [2]. Um dos meios de reduzir-se a quantidade de RCD disposto no meio ambiente e a extração de materiais minerais é a reciclagem do RCD e sua utilização na própria indústria que o desenvolveu. Embora a alta heterogeneidade das propriedades nos agregados reciclados provenientes de RCD seja responsável pela limitação da sua aplicação em algumas situações. Por outro lado, possibilita, com sucesso, aplicação em situações de menor exigência de qualidade, como por exemplo na pavimentação rodoviária

Depois das várias vantagens citadas em cima, tanto ao nível do BAC como ao nível da reciclagem de agregados grossos reciclados, é notório que a combinação dos dois poderá trazer inúmeras vantagens. Sendo ainda uma área pouco investigada, e de acordo com a bibliografia, o uso de um agregado grosso reciclado para produção de um BAC é justificado a partir de uma escolha adequada dos materiais e processo de mistura e desta forma podem ser obtidos betões de alto desempenho no que diz respeito à componente ambiental e propriedades mecânicas

Capítulo 3 - Descrição do programa experimental

3.1 Introdução

Depois de feito um levantamento do estado de arte, no Capítulo 2, a próxima fase tem como objectivo a descrição do programa experimental elaborado no decurso desta investigação. Neste Capítulo serão descritos todos os materiais utilizados, assim como os ensaios realizados e respectivas normas.

O Capítulo começa por descrever a selecção e caracterização dos materiais utilizados. Segue-se o estudo em argamassas, que tem como objectivo estabelecer as propriedades reológicas de acordo com o método proposto por Nepomuceno. Posteriormente, é feito o estudo em betões, através de cinco composições com incorporações de agregados grossos reciclados em diferentes percentagens de substituição do agregado natural e são avaliadas as suas propriedades quer no estado fresco, quer no estado endurecido.

3.2 Selecção e caracterização dos materiais utilizados

A selecção dos materiais utilizados neste trabalho foi orientada pela pesquisa bibliográfica e pela disponibilidade de materiais existentes no laboratório da UBI. Para facilitar a sua descrição, os materiais seleccionados foram subdivididos nos seguintes grupos: Ligante, adição, adjuvante, agregados e água.

3.2.1 Ligante

O ligante utilizado para a fase experimental foi o cimento portland (CEM I 42,5R). Os resultados da análise química, dos ensaios mecânicos e dos ensaios físicos efectuados para este ligante no processo de auto-controlo utilizado pelo fabricante (SECIL) encontram-se presentes na ficha técnica representada no Anexo A. Contudo, foi ainda determinada a massa específica deste material de acordo com os procedimentos descritos na Especificação do LNEC E 64-1960 [9].

3.2.2 Adição

Como adição, foi utilizada uma adição do tipo I, mais propriamente o fíler calcário, cedido pela empresa COMITAL, sob a designação comercial de MICRO 100 AB. Este fíler calcário apresenta-se na forma de pó, sendo basicamente constituído por carbonato de cálcio oolítico. Para este material, após a sua recepção, foi determinada a massa específica, de acordo com a Especificação do LNEC E 64-1960 [9].

3.2.3 Adjuvante

O adjuvante seleccionado para a fase experimental foi um superplastificante produzido pela empresa SIKA, comercialmente designado de Sika Viscocrete 3005. As principais características deste adjuvante foram fornecidas pelo fabricante e constam na ficha técnica do produto, apresentada no Anexo A.

3.2.4 Agregados

Tendo em conta a especificidade do estudo da composição dos betões auto-compactáveis, e como definido pelo método proposto por Nepomuceno, optou-se por definir que a máxima dimensão do agregado mais grosso não deveria ultrapassar os 19,1 mm. A selecção dos agregados dividiu-se em três grupos:

- Agregados finos
- Agregados grossos
- Agregados grossos reciclados

As propriedades dos agregados foram avaliadas tendo em conta os seguintes ensaios:

- A determinação da massa volúmica dos agregados saturados de água e com a superfície seca, de acordo com as normas portuguesas NP 954 [30] e NP 581 [29];
- A determinação da baridade do material seco compactado, de acordo com a Norma Portuguesa NP-955 [31];
- A determinação da absorção de água, de acordo com a Norma Portuguesa NP-581 [29] e Especificação do LNEC E248-1971 [13];
- A análise granulométrica, efectuada de acordo com os procedimentos descritos na especificação do LNEC E245-1971 [10].

3.2.4.1 Agregados finos

Quanto aos agregados finos a escolha recaiu sobre uma areia natural rolada fina proveniente da Figueira da Foz com a designação comercial de Areia 0/2 (figura 3.1) e uma areia natural rolada de grão intermédio proveniente de Abrantes, com a designação comercial de Areia 0/4 (figura 3.2). Estas areias foram cedidas pela central de produção de betão (Betão Liz). Neste trabalho, estas areias são designadas, respectivamente, por AF (areia fina) e AG (areia grossa).



Figura 3.1- Areia AF



Figura 3.2- Areia AG

3.2.4.2 Agregado grosso

Foram usados, tendo em conta o objectivo do trabalho, dois tipos de agregados: Os agregados grossos naturais e os agregados grossos reciclados.

No que respeita aos agregados grossos naturais, foram utilizados inertes britados de granito com origem na Quinta da Caçoa - Fundão, fornecidos pela pedreira Bartolomeu, sob a designação comercial de Brita 3/6 e Brita 6/15. Geologicamente este tipo de granito é classificado como um granito de matriz equigranular, porfiróide e biotítico.

Para este trabalho adoptaram-se as designações de B1 (figura 3.3) e B2 (figura 3.4) que representam respectivamente as britas 3/6 e 6/15.



Figura 3.3 Brita B1



Figura 3.4- Brita B2

No que diz respeito aos agregados grossos reciclados, foram obtidos partir da britagem de antigos provetes de betão, armazenados no laboratório de betões da Universidade da Beira Interior.

A britagem foi feita a partir de uma britadeira, representada na figura 3.5, e regulada de forma a obter agregados de aproximadamente 12 mm (figura 3.6).



Figura 3.5- Britadeira



Figura 3.6- Agregados britados

Uma vez britados os agregados, estes foram divididos manualmente através do peneiro de 4 mm da série europeia, de forma a diferenciar os agregados reciclados finos e grossos. Após esta operação, os agregados grossos reciclados, estes foram divididos, manualmente, em duas parcelas:

- BR1- Agregado reciclado grosso que passa no peneiro de 8 mm da série europeia, representado na figura 3.7.
- BR2- Agregado reciclado grosso que fica retido no peneiro de 8 mm da série europeia, representado na figura 3.8.



Figura 3.7- Agregados reciclados grossos BR1



Figura 3.8- Agregados reciclados grossos BR2

3.2.5 Água de amassadura

Não existiu nenhuma preocupação especial quanto às características da água de amassadura. Seguindo a recomendação usual nestas situações foi utilizada água potável da rede pública de abastecimento, de acordo com a Especificação do LNEC E372 [8].

3.3 Estudo em argamassas

Depois de seleccionados e estudados os materiais a utilizar neste trabalho, passou-se para a fase seguinte que consistiu no estudo em argamassas. O primeiro passo foi obter a curva granulométrica referente à mistura das duas areias, através da manipulação das percentagens da mistura, que melhor se aproxima da curva de referência, descrita no quadro 2.1 do subcapítulo 2.1.7.3.2.

Os parâmetros para o cálculo das composições das argamassas, foram obtidos partindo de um valor de V_p/V_s de 0,8 e de resistências a compressão de 55 ± 3 MPa aos 28 dias. Os restantes parâmetros (W/C , f_{ad} , V_w/p , $S_p/p\%$) resultam das correlações propostas pelo método de Nepomuceno e descritas no subcapítulo 2.1.7.3.3.

Cada amassadura experimental de argamassa foi calculada para um volume de 1,60 litros. Utilizou-se uma folha de cálculo (EXCEL) para o estudo da composição das argamassas, esquematizadas no Anexo G.

As correcções feitas nas argamassas para a obtenção das propriedades reológicas pretendidas foram feitas de acordo com o descrito no subcapítulo 2.1.7.3.8.

3.3.1 Procedimento de amassadura

A sequência de amassadura das argamassas seguiu o procedimento, proposto no método de Nepomuceno, descrito no subcapítulo 2.1.7.3.5.

Para a realização das amassaduras foi utilizada a misturadora que se ilustra na figura 3.9. Trata-se de uma misturadora programável destinada normalmente à produção de pastas e argamassas. Todo o processo de entrada dos componentes e de paragem e arranque da misturadora foi controlado manualmente. O tempo de mistura foi medido com um cronómetro que parava sempre que a mistura era interrompida para a limpeza das pás. A introdução do superplastificante foi efectuada sem interrupção do movimento das pás.



Figura 3.9- Misturadora de argamassas

3.3.2 Ensaios em argamassa

Com o objectivo de obter as propriedades reológicas pretendidas em argamassas, os ensaios utilizados foram: o ensaio de fluidez e o ensaio espalhamento.

3.3.2.1 Ensaio de Fluidez

A primeira etapa do ensaio de fluidez consistiu (figura 3.10) na limpeza do funil com um pano ligeiramente humedecido e no seu posicionamento sobre uma base firme e nivelada. No decurso do ensaio garantiu-se que não ocorriam movimentos sobre o funil que pudessem influenciar o escoamento da argamassa.

Garantidas as condições referidas no parágrafo anterior procedeu-se ao enchimento do funil. Após o enchimento, a superfície superior foi alisada mas não foi aplicada qualquer vibração ou outro modo de compactação.

Na etapa seguinte, a comporta inferior é aberta e com o recurso a um cronómetro procede-se à medição do tempo de escoamento. O tempo de escoamento decorre desde o momento exacto em que se abre a referida comporta até que se observa, de cima para baixo, o primeiro raio de luz no fundo do funil. A resposta do ensaio é traduzida tempo de escoamento (t).



Figura 3.10- Ensaio de fluidez das argamassas

3.3.2.2 Ensaio de espalhamento

A execução do ensaio exige que o cone de espalhamento seja colocado sobre uma superfície lisa, desempenada, nivelada e sem saliências ou reentrâncias que influenciem o movimento da argamassa durante a sua deformação. O cone e a superfície que lhe serve de base devem ser limpos antes do ensaio com recurso a um pano ligeiramente humedecido.

O ensaio de espalhamento iniciou-se com o enchimento do tronco cónico com argamassa no estado fresco e logo após a sua amassadura. A superfície superior foi alisada mas não foi aplicada qualquer vibração ou outro modo de compactação. De seguida, o tronco cónico (figura 3.11) é levantado e a argamassa espalha-se até atingir o seu diâmetro máximo de espalhamento, o que coincide com o instante em que o movimento cessa.



Figura 3.11- Cone de espalhamento das argamassas

Uma vez cessado o movimento da argamassa, procede-se à medição de dois diâmetros segundo duas direcções sensivelmente perpendiculares (figura 3.12). A resposta do ensaio é traduzida pelo diâmetro médio de espalhamento (D_m).



Figura 3.12- Ensaio de espalhamento das argamassas

3.4 Estudo em betões

Uma vez obtida a argamassa com as propriedades reológicas pretendidas para este trabalho, passa-se para a próxima fase que é o estudo em betões. Tendo em conta o objectivo do trabalho foram estudados cinco composições de betões auto-compactáveis, com diferentes incorporações de agregados grossos reciclados (0%, 10%, 20%, 30% e 40%).

O primeiro passo foi obter a curva granulométrica referente à mistura dos agregados grossos naturais (B1 e B2) e da mistura dos agregados grossos reciclados (BR1 e BR2), através da manipulação das percentagens de mistura, que melhor se aproxima da curva de referência, descrita no quadro 2.2 do subcapítulo 2.1.7.3.2. Uma vez obtidas as duas curvas reais da mistura, e próximas da curva referência, realizou-se a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados, de acordo com as percentagens descritas no parágrafo anterior.

O estudo da composição dos betões foi feito tendo em conta os parâmetros obtidos na argamassa e o parâmetro V_m/V_g . O parâmetro V_m/V_g obtêm-se, de acordo com o descrito no subcapítulo 2.1.7.3.9, partindo de um valor para o ensaio da caixa L de $H_1/H_2 \geq 0,85$.

Cada amassadura experimental de betão foi calculada para um volume de 25 litros e para o cálculo da composição utilizou-se uma folha de cálculo (EXCEL), que se encontra exposta no Anexo H.

A sequência de amassadura dos betões seguiu o procedimento descrito no subcapítulo 2.1.17.3.11 e as correcções efectuadas no betão fresco seguiram o procedimento descrito no subcapítulo 2.1.7.3.14.

3.4.1 Ensaios no betão em estado fresco

Com o objectivo de avaliar as propriedades reológicas e de auto-compactabilidade do betão fresco, os ensaios utilizados foram os ensaios de espalhamento, de fluidez e a caixa L.

3.4.1.1 Ensaio de espalhamento

A execução do ensaio exige que o cone de espalhamento seja colocado sobre uma superfície lisa, desempenada, nivelada e sem saliências ou reentrâncias que influenciem o movimento do betão durante a sua deformação (figura 3.13). O cone e a superfície que lhe serve de base devem ser limpos antes do ensaio com recurso a um pano ligeiramente humedecido.



Figura 3.13- Mesa de espalhamento

O ensaio de espalhamento consiste no enchimento do tronco cone com betão no estado fresco e logo após a sua amassadura. A superfície superior poderá ser alisada mas não deverá ser aplicada qualquer vibração ou outro modo de compactação. Quando o betão atinge o seu diâmetro máximo de espalhamento, o que coincide com o instante em que o movimento cessa, são medidos dois diâmetros segundo duas direcções sensivelmente perpendiculares (figura 3.14). A resposta do ensaio é traduzida pelo diâmetro médio de espalhamento (D_m).



Figura 3.14- Ensaio de espalhamento

3.4.1.2 Ensaio de fluidez

A primeira etapa do ensaio consiste na limpeza do funil com um pano ligeiramente humedecido e no seu posicionamento sobre uma base firme e nivelada. No decurso do ensaio deverá ainda garantir-se que não ocorram movimentos sobre o funil que influenciem o escoamento do betão.

Garantidas as condições referidas no parágrafo anterior procede-se ao enchimento do funil (figura 3.15). Após o enchimento, a superfície superior poderá ser alisada mas não deverá ser aplicada qualquer vibração ou outro modo de compactação.

Na etapa seguinte, a comporta colocada na base do funil é aberta e simultaneamente é accionado o cronómetro, dando-se início à medição do tempo de escoamento. O tempo de escoamento decorre desde o momento exacto em que se abre a referida comporta até que, observando o funil de cima para baixo, surja o primeiro raio de luz no fundo do funil.



Figura 3.15- Ensaio de fluidez

3.4.1.3 Ensaio da Caixa-L

A primeira etapa do ensaio consiste na limpeza da caixa com um pano ligeiramente humedecido e no seu posicionamento sobre uma base firme e nivelada. Para esse efeito optou-se por posicionar o equipamento sobre uma pequena mesa previamente nivelada (figura 3.16). Este procedimento permite, não só facilitar o nivelamento da caixa, como também, facilitar a descarga do betão após o ensaio. No decurso do ensaio deverá ainda garantir-se que não ocorram movimentos sobre a caixa que influenciem o escoamento do betão.

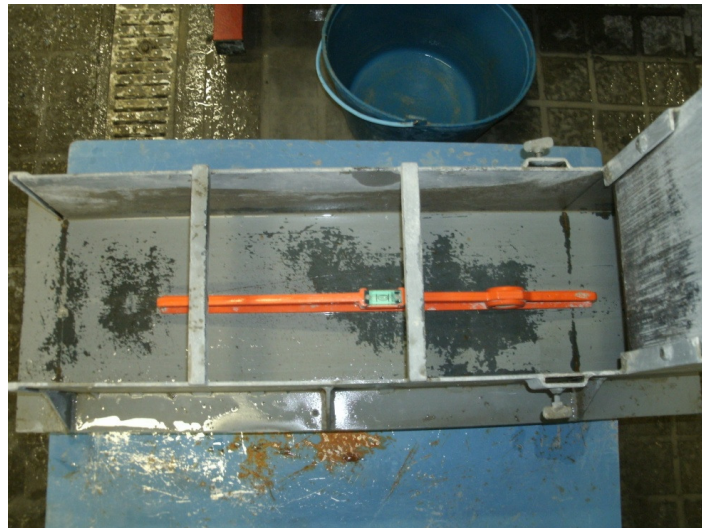


Figura 3.16- Posicionamento e nivelamento da Caixa-L

Garantidas as condições referidas no parágrafo anterior procede-se ao enchimento da Caixa-L (figura 3.17). Após o enchimento, a superfície superior poderá ser alisada mas não deverá ser aplicada qualquer vibração ou outro modo de compactação.



Figura 3.17- Enchimento da Caixa-L

Uma vez cessado o movimento do betão (figura 3.18) procede-se à medição dos parâmetros H1 e H2, e após a realização de todas as leituras, a descarga da caixa pode ser efectuada facilmente mediante a abertura de uma comporta posicionada na sua extremidade.



Figura 3.18- Fim do movimento do betão na Caixa L

3.4.1.4 Produção e preparação de provetes para os ensaios de compressão

Para cada amassadura experimental, após a execução dos ensaios para avaliação das propriedades dos betões no estado fresco, procedeu-se à moldagem de cinco provetes cúbicos de 150 mm de aresta destinados aos ensaios de resistência à compressão, massa volúmica e módulo de elasticidade dinâmico. O betão fresco foi simplesmente vertido nos moldes e a superfície alisada com uma colher de pedreiro. Não foi aplicada vibração ou qualquer outra forma de compactação ao betão.

Os provetes assim moldados permaneceram no interior do laboratório durante 24 horas. Após esse período os provetes foram identificados, descofrados e colocados em câmaras de cura, onde permaneceram com temperaturas de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa superior a 95%, até à data em que foram ensaiados, em conformidade com a Especificação do LNEC E255 [14]. Dos cinco provetes produzidos em cada amassadura (Figura 3.19), dois foram ensaiados aos 7 dias de idade e os restantes três foram ensaiados aos 28 dias de idade.



Figura 3.19- Provetes de betão

3.4.2 Ensaios do betão em estado endurecido

3.4.2.1 Ensaios do módulo de elasticidade dinâmico

Uma vez completado o tempo de cura previsto, os provetes foram retirados da câmara de cura e permaneceram no interior do laboratório até apresentarem uma superfície seca.

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico foi efectuado de acordo com os procedimentos descritos na norma inglesa BS 1881-203:1986 [28], aos 7 dias e 28 dias para todos os betões estudados, através do aparelho ilustrado na figura 3.20.



Figura 3.20- Aparelho de medição da velocidade de ultra-sons em betão

3.4.2.2 Ensaio de compressão

Antes ainda de se proceder ao ensaio à compressão, cada um dos provetes foi pesado e o seu valor registado para uma posterior estimativa da massa volúmica.

Os provetes foram ensaiados segundo a direcção perpendicular à direcção de betonagem, ou seja, com a face superior em relação à moldagem voltada para o observador. A taxa de compressão adoptada no ensaio foi de 13,5 kN/s. Em síntese, os ensaios decorreram de acordo com a especificação do LNEC E226-1968 [12].

Capítulo 4 - Apresentação e discussão dos resultados

4.1 Generalidades

Neste capítulo, apresentar-se-ão os resultados obtidos nos ensaios efectuados durante a campanha experimental, ensaios esses descritos no Capítulo 3. Paralelamente à sua apresentação, realizar-se-á uma análise comparativa dos mesmos, de forma a correlacionar as variações com os vários níveis de substituição de agregados grossos reciclados

4.2 Massa específica dos materiais finos

Como descrito anteriormente, a massa específica dos materiais finos (cimento e fíler calcário) foram determinadas de acordo com os procedimentos descritos na Especificação do LNEC E 64-1960 [9].

No quadro 4.1, apresentam-se os valores finais das massas específicas do cimento e do fíler calcário. No Anexo B encontram-se todas as medições e cálculos intermédios.

Quadro 4.1- Massa volúmica dos materiais finos

Material fino	Designação	Massa Volúmica [Kg/m ³]
Cimento	CEM I 42,5R	3140
Fíler calcário	MICRO 100 AB	2720

4.1 Ensaio dos agregados

4.1.1 Análise granulométrica

Como exposto anteriormente, a análise granulométrica seguiu os procedimentos descritos na especificação do LNEC E245-1971 [10].

Nos subcapítulos a seguir estão representados, de forma resumida, os módulos de finura, a distribuição e curvas granulométrica dos agregados. No Anexo F encontram-se de forma detalhada, todos os resultados das medições e cálculos efectuados.

4.1.1.1 Agregados finos

As distribuições granulométricas dos agregados finos, bem como os módulos de finura, estão apresentados no quadro 4.2.

Na figura 4.1, apresentam-se as curvas granulométricas, onde as abcissas representam a dimensão das partículas e as ordenadas a percentagem de material que passa em cada um dos peneiros.

Quadro 4.2 Distribuição granulométrica dos agregados finos

Peneiro	Malha (mm)	Areia AF	Areia AG
		Percentagens acumuladas de material que passa nos peneiros	
3"	76,200	100,0	100,0
(*) 2"	50,800	100,0	100,0
1" 1/2	38,100	100,0	100,0
(*) 1"	25,400	100,0	100,0
3/4"	19,100	100,0	100,0
(*) 1/2"	12,700	100,0	100,0
3/8"	9,520	100,0	100,0
n° 4	4,760	100,0	99,8
n° 8	2,380	99,9	78,0
n° 16	1,190	99,5	42,8
n° 30	0,590	82,8	18,2
n° 50	0,297	20,5	5,3
n° 100	0,149	1,2	1,4
n° 200	0,074	0,2	0,4
Resíduo		0,1	0,1
Módulo de finura		1,960	3,545

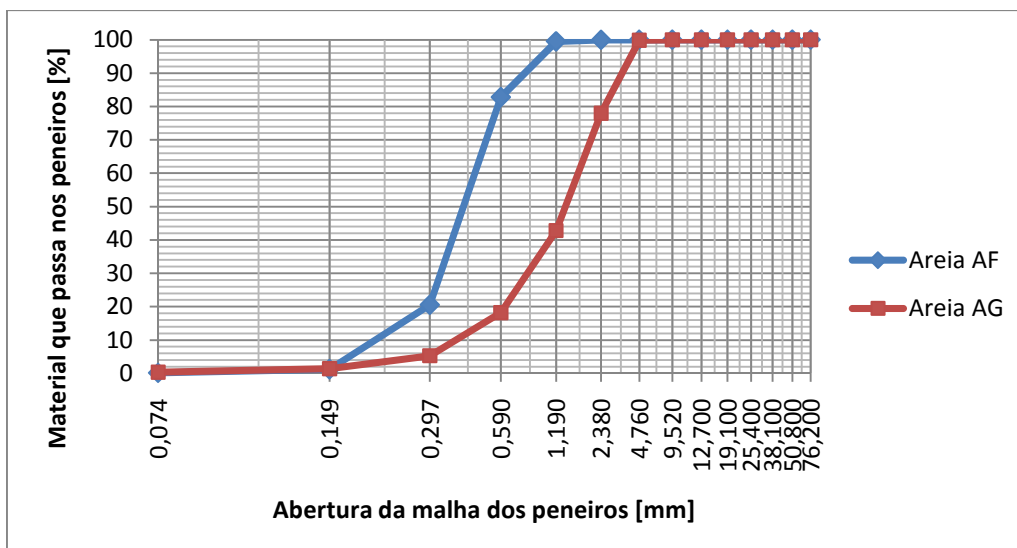


Figura 4.1 Curva granulométrica dos agregados finos

4.1.1.2 Agregados grossos naturais

As distribuições granulométricas feitas aos agregados grossos naturais, bem como os módulos de finura, estão apresentados no quadro 4.3.

Quadro 4.3- Distribuição granulométrica dos agregados grossos naturais

Peneiro	Malha (mm)	Brita B1	Brita B2
		Percentagens acumuladas de material que passa nos peneiros	
3"	76,200	100,0	100,0
(* 2"	50,800	100,0	100,0
1" 1/2	38,100	100,0	100,0
(* 1"	25,400	100,0	100,0
3/4"	19,100	100,0	100,0
(* 1/2"	12,700	100,0	86,9
3/8"	9,520	100,0	48,5
n° 4	4,760	61,6	5,1
n° 8	2,380	5,2	2,6
n° 16	1,190	1,1	2,1
n° 30	0,590	0,5	1,6
n° 50	0,297	0,3	1,1
n° 100	0,149	0,2	0,6
n° 200	0,074	0,1	0,3
Resíduo		0,0	0,0
Módulo de finura		5,311	6,385

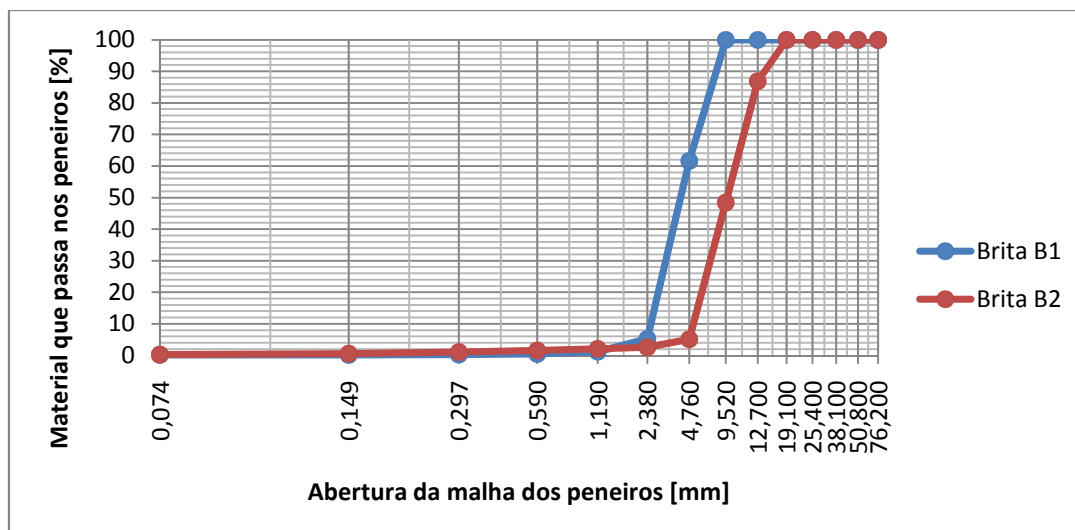


Figura 4.2 Distribuição granulométrica dos agregados grossos naturais

Na figura 4.2, apresentam-se as curvas granulométricas, onde as abcissas representam a dimensão das partículas e as ordenadas a percentagem de material que passa em cada um dos peneiros.

4.1.1.3 Agregados grossos reciclados

As distribuições granulométricas dos agregados grossos naturais, bem como os módulos de finura, são apresentados no quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados

Peneiro	Malha (mm)	Brita BR1	Brita BR2
		Percentagens acumuladas de material que passa nos peneiros	
3"	76,200	100,0	100,0
(* 2"	50,800	100,0	100,0
1" 1/2	38,100	100,0	100,0
(* 1"	25,400	100,0	100,0
3/4"	19,100	100,0	99,3
(* 1/2"	12,700	100,0	46,0
3/8"	9,520	99,2	14,0
n° 4	4,760	21,3	0,3
n° 8	2,380	5,7	0,1
n° 16	1,190	0,7	0,1
n° 30	0,590	0,4	0,1
n° 50	0,297	0,3	0,1
n° 100	0,149	0,1	0,1
n° 200	0,074	0,1	0,0
Resíduo		0,0	0,0
Módulo de finura		5,723	6,861

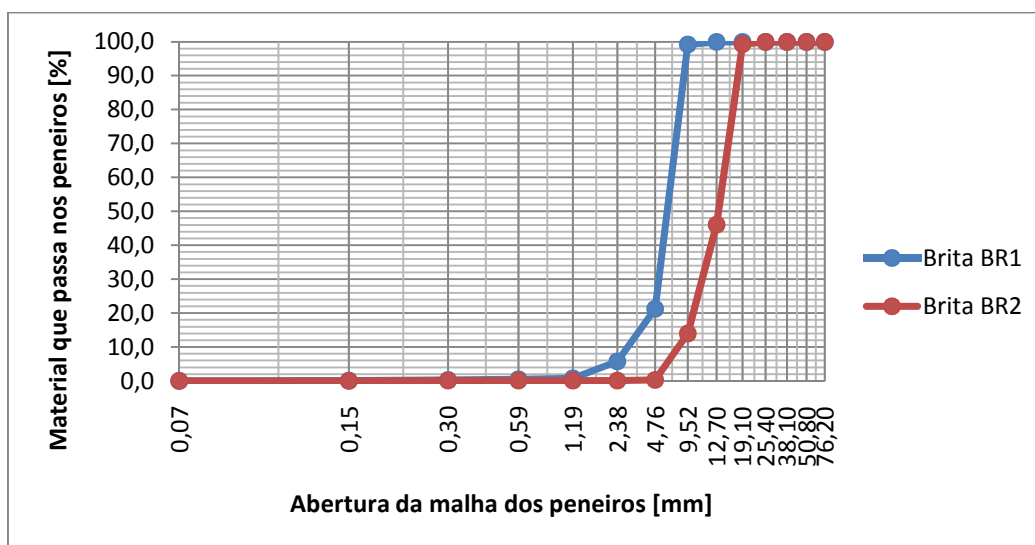


Figura 4.3 - Distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados

Na figura 4.3 apresentam-se as curvas granulométricas, onde as abcissas representam a dimensão das partículas e as ordenadas a percentagem de material que passa em cada um dos peneiros

4.1.1.4 Curva granulométrica da mistura dos agregados finos

Como referido no subcapítulo 3.3 a curva granulométrica referente à mistura das duas areias foi obtida através da variação das percentagens das misturas, que melhor se aproxima da curva de referência.

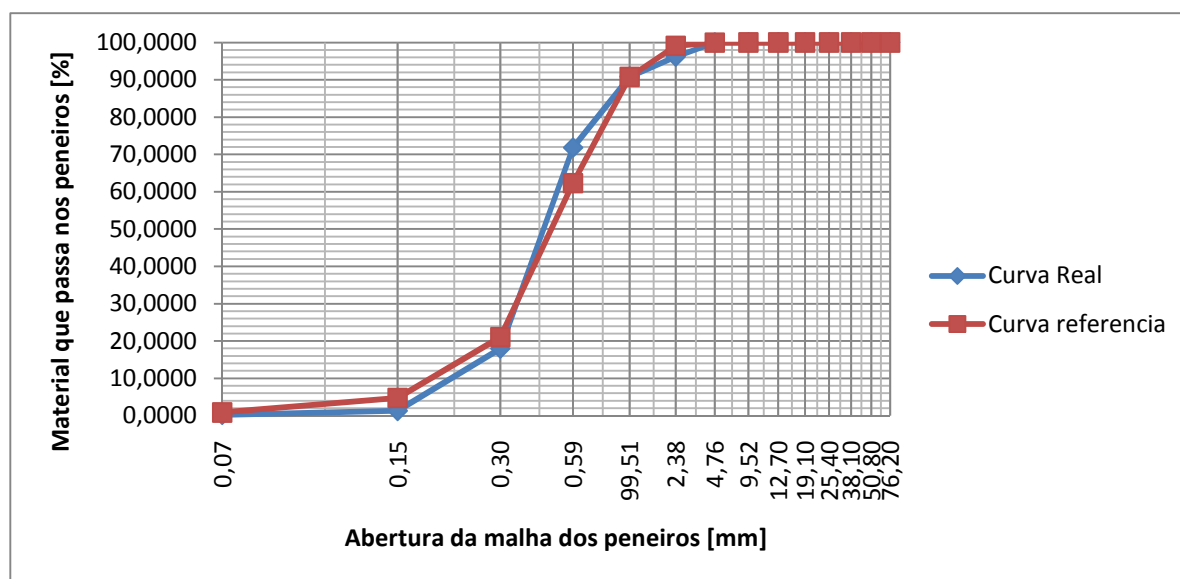
No quadro 4.5 é apresentada a distribuição granulométrica, bem como as percentagens das misturas das duas areias e a curva de referência proposta no método Nepomuceno.

Na figura 4,4, apresentam-se as curvas granulométricas, referentes à mistura das areias e a curva referência proposta no método Nepomuceno. Na figura 4.4 as abcissas representam a dimensão das partículas e as ordenadas a percentagem de material que passa em cada um dos peneiros.

Quadro 4.5- Distribuição granulométrica da mistura dos agregados finos

Peneiro	Malha	AF	AG	Curva Real	Curva referencia	Erro Percentual
		0,83	0,17			
	(mm)	Percentagens acumuladas de material que passa nos peneiros				
3"	76,200	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0
(* 2"	50,800	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0
1" 1/2	38,100	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0
(* 1"	25,400	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0
3/4"	19,100	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0
(* 1/2"	12,700	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0
3/8"	9,520	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0
n° 4	4,760	100,0	99,8	100,0	100,0	0,0
n° 8	2,380	99,9	78,0	96,2	99,1	2,9
n° 16	1,190	99,5	42,8	89,9	90,8	0,9
n° 30	0,590	82,8	18,2	71,8	62,3	9,5
n° 50	0,297	20,5	5,3	17,9	21,0	3,1
n° 100	0,149	1,2	1,4	1,3	4,7	3,5
n° 200	0,074	0,2	0,4	0,2	0,8	0,7
Resíduo		0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
Módulo de finura						Erro médio Percentual
		1,960	3,545	2,229	2,220	1,4

Figura 4.4 - Curva granulométrica da mistura dos agregados finos



Como foi mostrado no quadro 4.5, a melhor combinação encontrada é de 83% de AF e 17% de AG. De uma forma geral, a curva real da mistura encontra-se muito próxima da curva referência, com apenas 1,4 % de erro médio em relação a curva referência.

4.1.1.5 Curva granulométrica da mistura dos agregados grossos naturais

Como referido no subcapítulo 3.4, a curva granulométrica referente à mistura das duas britas naturais (B1 e B2), foi obtida através da manipulação das percentagens de mistura, que melhor se aproxima da curva de referência.

No quadro 4.6 é apresentada a distribuição granulométrica, bem como as percentagens de mistura das britas (B1 e B2) e a curva de referência proposta no método de Nepomuceno.

Na figura 4.5, apresentam-se as curvas granulométricas referentes à mistura das britas e a curva referência proposta no método de Nepomuceno. Na figura 4.5 as abcissas representam a dimensão das partículas e as ordenadas a percentagem de material que passa em cada um dos peneiros.

Quadro 4.6 - Distribuição granulométrica da mistura dos agregados grossos naturais

Peneiro	Malha	Brita B1	Brita B2	Curva Real	Curva referencia	Erro Percentual
		0,57	0,43			
	(mm)	Percentagens acumuladas de material que passa nos peneiros				
3"	76,2000	100,0	100,0	100,0	100,0	0,00
(*) 2"	50,8000	100,0	100,0	100,0	100,0	0,00
1" 1/2	38,1000	100,0	100,0	100,0	100,00	0,00
(*) 1"	25,4000	100,0	100,0	100,0	100,00	0,00
3/4"	19,1000	100,0	100,0	100,0	100,00	0,00
(*) 1/2"	12,7000	100,0	86,9	94,4	94,57	0,20
3/8"	9,5200	100,0	48,5	77,8	74,90	2,95
nº 4	4,7600	61,6	5,1	37,3	36,54	0,77
nº 8	2,3800	5,2	2,6	4,1	5,99	1,91
nº 16	1,1900	1,1	2,1	1,5	2,24	0,70
nº 30	0,5900	0,5	1,6	1,0	1,31	0,34
nº 50	0,2970	0,3	1,1	0,6	0,79	0,17
nº 100	0,1490	0,2	0,6	0,4	0,50	0,12
nº 200	0,0740	0,1	0,3	0,2	0,28	0,09
Resíduo		0,0	0,0	0,0	0,00	0,00
		Módulo de finura				Erro médio Percentual
		5,311	6,385	5,772	5,777	0,5

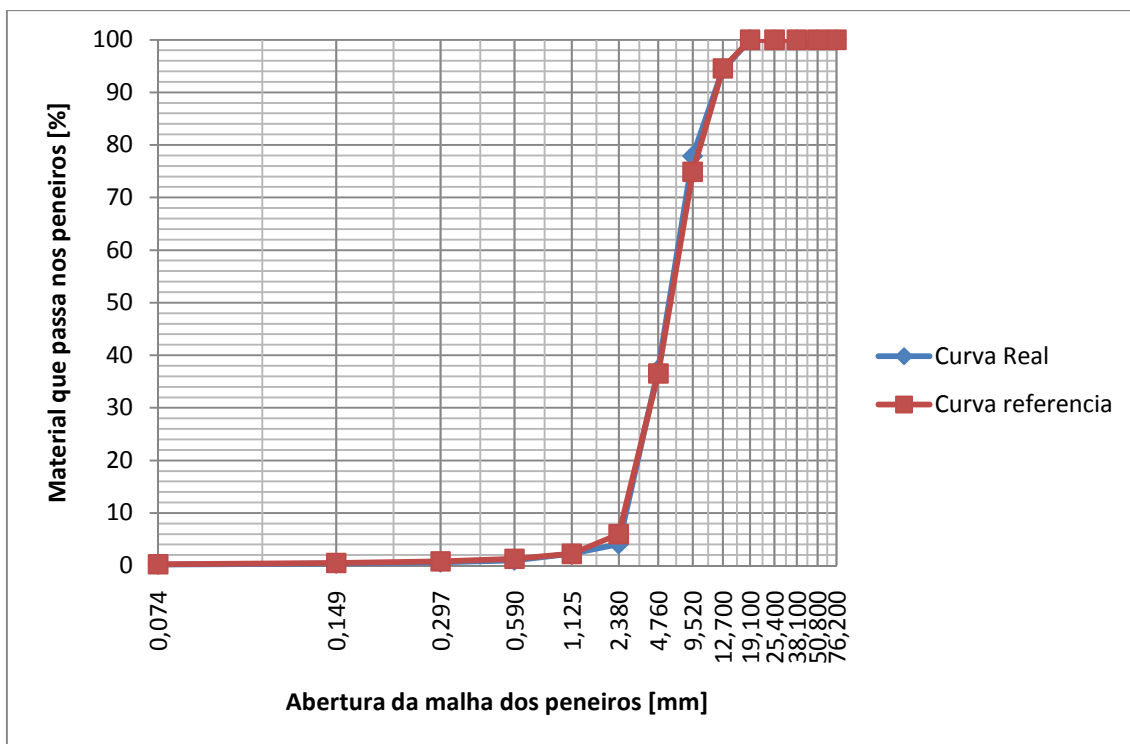


Figura 4.5 - Distribuição granulométrica da mistura dos agregados grossos naturais

Como foi mostrado no quadro 4.6, a melhor combinação encontrada é de 57% de B1 e 43% de B2. De uma forma geral a curva real da mistura encontra-se muito próxima da curva referência, com apenas 0,5 % de erro médio em relação a curva referência.

4.1.2 Massa volúmica e absorção de água dos agregados finos

No quadro 4.7 apresentam-se os resultados finais dos ensaios descritos no subcapítulo 3.2.4. Uma descrição mais precisa dos cálculos efectuados encontra-se nos Anexos C e D.

Quadro 4.7- Massa volúmica e absorção de água dos agregados finos

Designação	Massa volúmica	Absorção de água
	kg/m ³	%
AF	2570,0	0,3
AG	2610,0	0,4

4.1.3 Massa volúmica e absorção de água dos agregados grossos

No quadro 4.8, são apresentados os resultados finais dos ensaios descritos no subcapítulo 3.2.4. Uma descrição mais precisa dos cálculos efectuados encontra-se nos Anexos C e D

Quadro 4.8 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados grossos

Designação	Massa volúmica	Absorção de água
	kg/m ³	%
B1	2710	0,15
B2	2700	0,14
BR 1	2509	4,10
BR 2	2485	4,05

Como se pode observar no quadro 4.8, a massa volúmica dos agregados grossos reciclados é inferior à obtida nos agregados grossos naturais, facto este que era esperado devido à pasta endurecida que se encontra nos agregados grossos reciclados e que possui uma massa volúmica claramente menor, relativamente aos agregados grossos de origem natural.

Quanto à absorção de água obtida para aos agregados grossos reciclados, registou-se um valor bastante superior aos agregados grossos naturais, devido à elevada porosidade da pasta endurecida presente nos agregados grossos reciclados.

Os valores dos agregados grossos reciclados cumprem a especificação do LNEC E 471, pois apresentam um valor inferior a 7% de absorção de água e um valor superior a 2200 kg/m³ de massa volúmica.

4.1.4 Baridade dos agregados grossos

No quadro 4.9 apresentam-se os resultados finais dos ensaios descritos no subcapítulo 3.2.4. Uma descrição mais precisa dos cálculos efectuados encontra-se no Anexo E

Quadro 4.9 - Baridade dos agregados grossos

Agregados grossos	
Designação	Baridade
	kg/m ³
B1	1520,0
B2	1540,0
BR 1	1460,0
BR 2	1450,0

Como se pode reparar no quadro 4.9, os agregados grossos reciclados, como seria de esperar, apresentam uma redução significativa do valor da baridade, em virtude da pasta cimentícia, aderida a estes agregados, possuir uma massa inferior à dos agregados grossos naturais, pelo que, quanto maior for a percentagem desta, maior será a diferença de valores entre os agregados grossos reciclados e naturais.

4.2 Ensaio em argamassas

Como referido no subcapítulo 3.3.2, os ensaios em argamassas feitos para obter as propriedades reológicas pretendidas, incluíram os ensaios de fluidez e de espalhamento.

No quadro 4.10 apresentam-se todos os parâmetros necessários para avaliar as propriedades reológicas das argamassas. Os Parâmetros d1 e d2 são medidos no ensaio de espalhamento e representam os diâmetros medidos em direcções sensivelmente perpendiculares e o parâmetro d representa a média dos dois. O parâmetro d_o representa o diâmetro do cone de espalhamento e o parâmetro t representa o tempo de escoamento no ensaio de fluidez, em segundos.

Os parâmetros reológicos são definidos como Gm e Rm e o seu cálculo é feito de acordo com o descrito no subcapítulo 2.1.7.3.7.

Na figura 4.6 apresenta-se, de forma gráfica, o resumo dos parâmetros reológicos das diferentes argamassas.

Quadro 4.10 - Parâmetros reológicos das diferentes argamassas.

Argamassa	d [mm]		d_o [m]	t [s]	Gm	Rm [s^{-1}]
	d1	d2				
A1	340,0	339,0	100,0	5,0	10,5	2,0
	339,5					
A2	200,0	200,0	100,0	15,6	3,0	0,6
	200,0					
A3	229,0	222,0	100,0	11,0	4,1	0,9
	225,5					
A4	311,0	305,0	100,0	5,7	8,5	1,8
	308,0					
A5	260,0	262,0	100,0	8,1	5,8	1,2
	261,0					

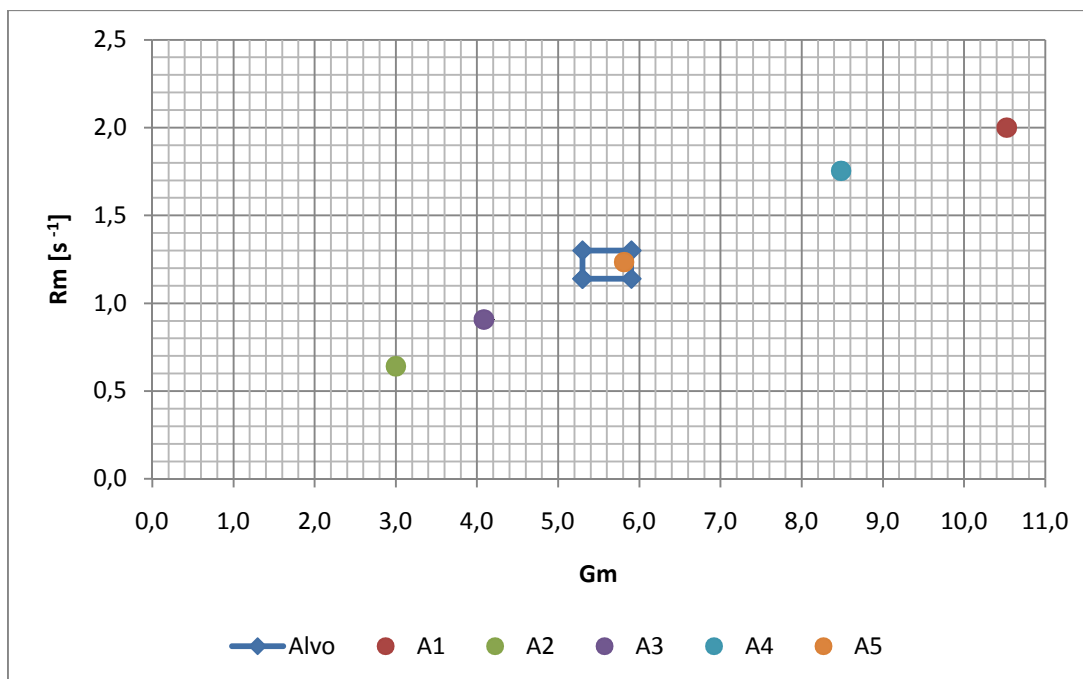


Figura 4.6 - Parâmetros reológicos das diferentes argamassas.

Foram necessárias cinco argamassas para acertar a reologia, como se observa no gráfico da figura 4.6. A argamassa que cumpre esses requisitos é a argamassa A5, com um valor de R_m de $1,2 \text{ s}^{-1}$, estando portando dentro do intervalo de valores considerados como admissíveis ($1,14 \text{ s}^{-1}$ e $1,3 \text{ s}^{-1}$), e um valor de G_m de $5,8$, estando portando dentro do intervalo de valores considerados como admissíveis ($5,3$ e $5,9$).

Para o acerto das argamassas foram foi necessário apenas um aumento/diminuição do superplastificante, consoante a necessidade. Não sendo necessário alterar a quantidade de água e logo mantendo constante a razão água/cimento.

4.3 Ensaios no betão em estado fresco

Como referido no subcapítulo 3.4.1, os ensaios realizados no betão em estado fresco, para obter as propriedades reológicas e de auto-compactabilidade pretendidas, foram os ensaios de fluidez, de espalhamento e o ensaio da Caixa L.

No quadro 4.11 estão apresentados os diferentes betões, com diferentes incorporações de agregado reciclado e os respectivos parâmetros obtidos através dos ensaios.

No ensaio de espalhamento, os parâmetros d_1 e d_2 representam os diâmetros medidos em direcções sensivelmente perpendiculares e d representa a média entre eles. O parâmetro d_0 representa o diâmetro inicial do cone de espalhamento.

No ensaio de fluidez é medido o parâmetro t , que representa o tempo de escoamento expresso em segundos. Os Parâmetros H1 e H2 representam as medidas obtidas no ensaio da caixa L.

Os parâmetros reológicos são definidos como G_c e R_c e o seu cálculo é feito de acordo com o descrito no subcapítulo 2.1.7.3.13

Na figura 4.7 apresenta-se, de forma gráfica, o resumo dos parâmetros reológicos obtidos nos diferentes betões e as respectivas correcções.

Quadro 4.11- Parâmetros reológicos dos diferentes betões

Betão	d [mm]		do [m]	t [s]	Gc	Rc [s ⁻¹]	H1/H2		Correcções	
	d1	d2					H1 [mm]	H2 [mm]	Agua [ml]	Superplastificante [g]
BRF	639,0	641,0	200,0	14,3	9,2	0,7	83,4	93,3	+10	+20
	640,0						0,89			
BRC10	638,0	636,0	200,0	14,1	9,1	0,7	h1	h2	+10	+20
	637,0						0,87			
BRC20	637,0	636,0	200,0	15,2	9,1	0,7	h1	h2	+20	+20
	636,5						0,88			
BRC30	638,0	636,0	200,0	14,7	9,1	0,7	h1	h2	+30	+20
	637,0						0,89			
BRC40	628,0	630,0	200,0	15,8	8,9	0,6	h1	h2	+30	+20
	629,0						0,87			

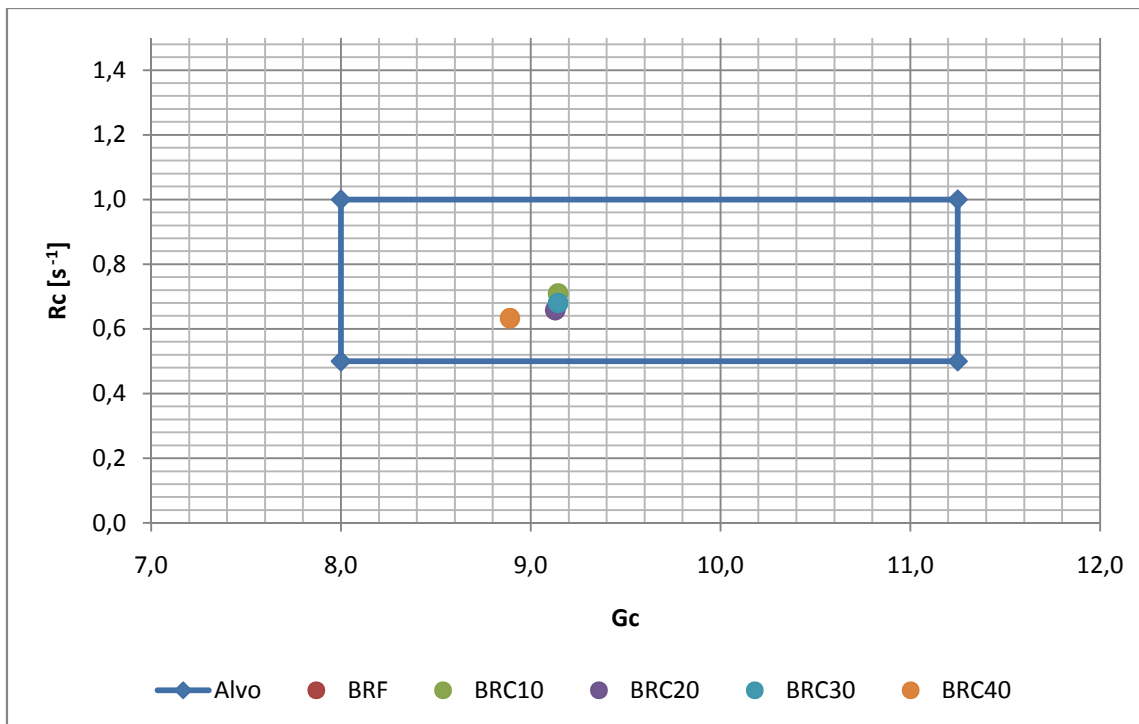


Figura 4.7 - Parâmetros reológicos dos diferentes betões

Como se pode observar no gráfico da figura 4.7, todos os betões cumprem os requisitos para os valores de R_c entre $0,5 \text{ s}^{-1}$ e 1 s^{-1} e para os valores de G_c entre 8,00 e 11,25.

O acerto nos betões foi feito apenas com o aumento de água e de superplastificante como mostra o quadro 4.11. De forma geral, estes acertos em termos de superplastificante foram constantes em todos os betões. A variação ocorreu na quantidade de água adicionada, verificando-se que em relação ao betão de referência (BRF) foi sempre necessário um pequeno acréscimo de água. Isto deve-se provavelmente ao facto dos agregados grossos reciclados apresentarem uma absorção de água muito superior à dos agregados grossos naturais, conforme referido no subcapítulo 4.3.3

4.4 Estudo do betão em estado endurecido

4.4.1 Resistência à compressão

Como descrito no subcapítulo 3.4.2.2, foram produzidos cinco provetes em cada amassadura dos betões. Destes provetes, dois foram ensaiados aos 7 dias de idade e os restantes três foram ensaiados aos 28 dias de idade.

No quadro 4.12 apresentam-se em resumo os valores obtidos para as resistências à compressão aos 7 e aos 28 dias, o desvio padrão das resistências, as diferenças das resistências relativamente ao BRF ($\Delta_{\text{BRF}, 28 \text{ dias}}$) e a percentagem de resistência obtida aos 7 dias quando comparado com a obtida aos 28

dias. No Anexo I, é possível consultar os valores individuais de cada provete ensaiado e os cálculos intermédios efectuados.

A figura 4.8 apresenta graficamente as resistências obtidas aos 7 e aos 28 dias.

Quadro 4.12- Resumo das resistências à compressão

Designação do betão	Resistência à compressão [MPa]		Desvio padrão		$\Delta_{\text{BRF},28 \text{ dias}}$ [%]	R7/R28 [%]
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias		
BRF	43,8	54,2	0,5	0,4	-	80,8
BRC10	43,3	53,9	0,6	0,6	-0,5	80,3
BRC20	43,1	53,7	0,5	0,4	-1,0	80,3
BRC30	42,9	53,3	0,3	0,3	-1,6	80,5
BRC40	42,5	53,0	0,5	0,7	-2,2	80,1

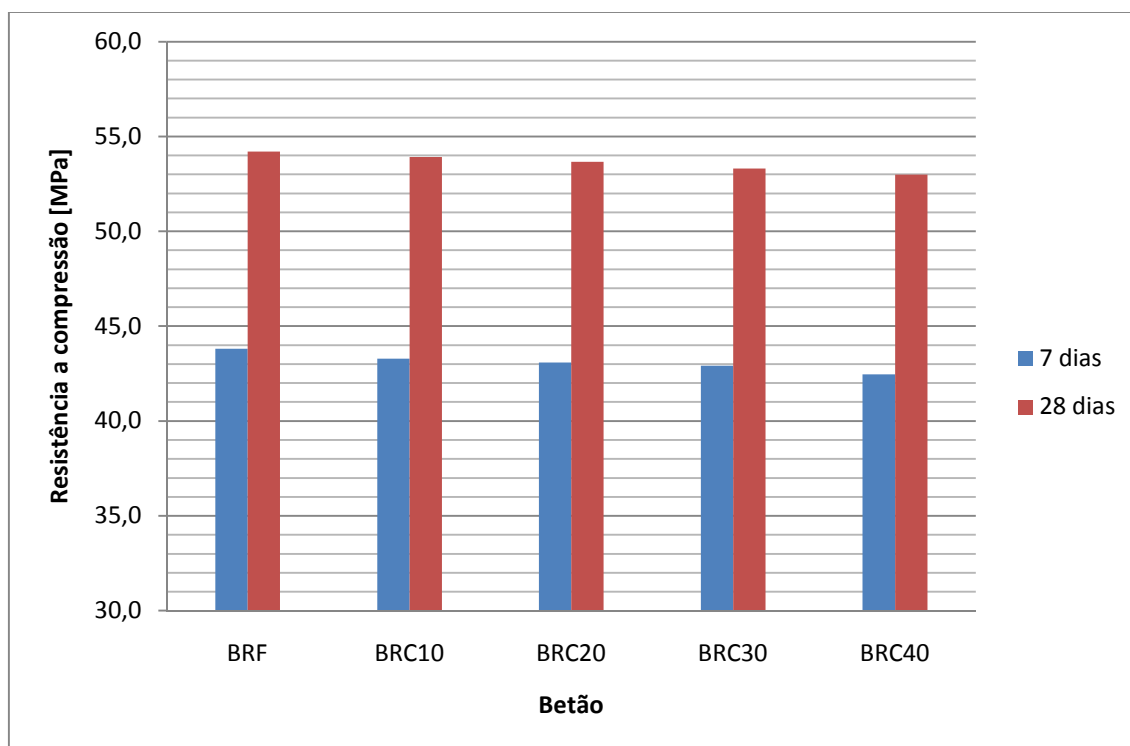


Figura 4.8 - Resumo das resistências à compressão

Como se pode observar no quadro 26 as resistências à compressão não apresentam diferenças muito elevadas em relação ao betão de referência (BRF), embora se note um pequeno decréscimo da resistência com a incorporação de agregados grossos reciclados, onde o valor máximo de perda de resistência encontra-se nos 2,2%, obtido no betão com maior incorporação de agregados grossos (BRC40).

Pode-se admitir que os agregados grossos reciclados, utilizados nas diversas composições, possuem propriedades próximas da matriz cimentícia do betão, pelo que a rotura destes não será factor condicionante da resistência do betão. O bom desempenho registado pode ser justificado pelo facto de se estabelecerem melhores ligações entre a pasta de cimento e os agregados grossos reciclados, devido à sua maior rugosidade e à sua elevada porosidade, que terão compensado a sua menor resistência intrínseca.

Não é possível estabelecer uma relação entre a incorporação de agregados grossos reciclados e as resistências iniciais, visto existir uma variação não uniforme nos diferentes betões. Mas de uma forma geral, após 7 dias, os betões analisados apresentam uma resistência à compressão de aproximadamente 80% da resistência obtida aos 28 dias.

4.4.2 Massa volúmica

Como descrito no subcapítulo 3.4.2.2, todos os provetes foram pesados, e sabendo as suas dimensões, foi calculada a massa volúmica, representada no quadro 4.13.

No quadro 4.13, para além de apresentadas as massas volúmicas médias, também se incluem as diferenças das massas volúmicas relativamente ao BRF ($\Delta_{\text{BRF},28 \text{ dias}}$) e as perdas de massa volúmica entre os 7 e os 28 dias de idade ($\Delta_{\text{massa. volúmica}}$).

Na figura 4.9 estão apresentados de forma gráfica as massas volúmicas obtidas aos 7 e aos 28 dias de idade.

No Anexo I, é possível consultar os valores individuais de cada provete ensaiado e os cálculos intermédios efectuados.

Quadro 4.13 - Resumo das massas volúmicas dos betões

Designação do betão	Massa volúmica [Kg/m3]		$\Delta_{\text{BRF},28 \text{ dias}}$ [%]	$\Delta_{\text{massa. volumica}}$ [%]
	7 dias	28 dias		
BRF	2370	2360	-	0,4
BRC10	2363	2347	-0,6	0,7
BRC20	2353	2334	-1,1	0,8
BRC30	2353	2334	-1,1	0,8
BRC40	2350	2335	-1,1	0,6

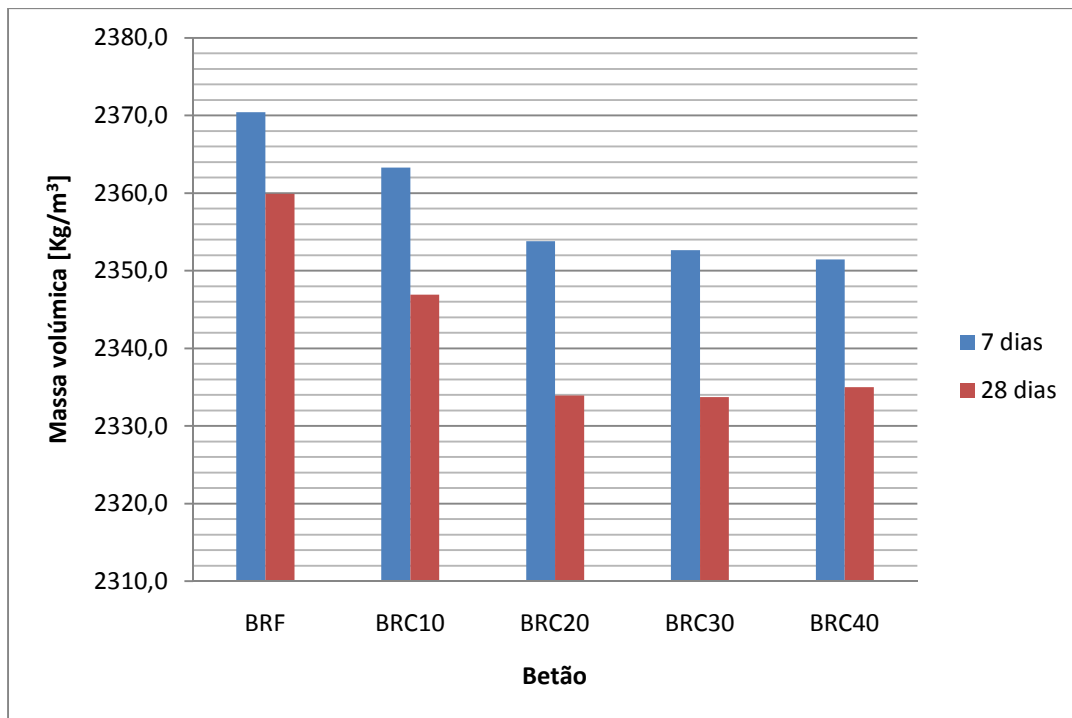


Figura 4.9- Resumo das massas volúmicas dos betões

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a massa volúmica dos betões no estado endurecido diminui com a incorporação dos agregados grossos reciclados em substituição dos agregados grossos naturais. Este facto era esperado, visto os agregados grossos reciclados apresentarem um valor de massa volúmica inferior comparativamente com os agregados grossos naturais, devido à maior porosidade e menor densidade da pasta cimentícia aderida aos primeiros.

Não é possível estabelecer uma relação entre a incorporação de agregados grossos reciclados e as perdas de massa volúmica entre os 7 e os 28 dias, visto existir uma variação não uniforme nos diferentes betões.

4.4.3 Módulo de elasticidade dinâmico

Como descrito no subcapítulo 3.4.2, todos os provetes foram sujeitos ao ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.

No quadro 4.14, para além de apresentados os módulos de elasticidade dinâmicos médios, também são apresentadas as diferenças dos módulos de elasticidade relativamente ao BRF ($\Delta_{\text{BRF},28 \text{ dias}}$), e as perdas do módulo de elasticidade dinâmico entre os 7 e os 28 dias ($\Delta_{\text{módulo de elasticidade}} [\%]$).

Na figura 4.10 são esquematizados de forma gráfica os resultados médios dos módulos de elasticidade obtidos aos 7 e aos 28 dias.

No Anexo J, é possível consultar os valores individuais de cada provete ensaiado e os cálculos intermédios efectuados.

Quadro 4.14 - Resultados médios do módulo de elasticidade

Designação do betão	Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]		Δ BRF, 28 dias [%]	Δ modulo de elasticidade [%]
	7 dias	28 dias		
BRF	32,0	39,5	-	81,0
BRC10	32,0	39,0	-1,2	82,0
BRC20	30,2	38,8	-1,8	78,0
BRC30	30,5	38,6	-2,4	79,0
BRC40	30,6	38,3	-3,1	79,9

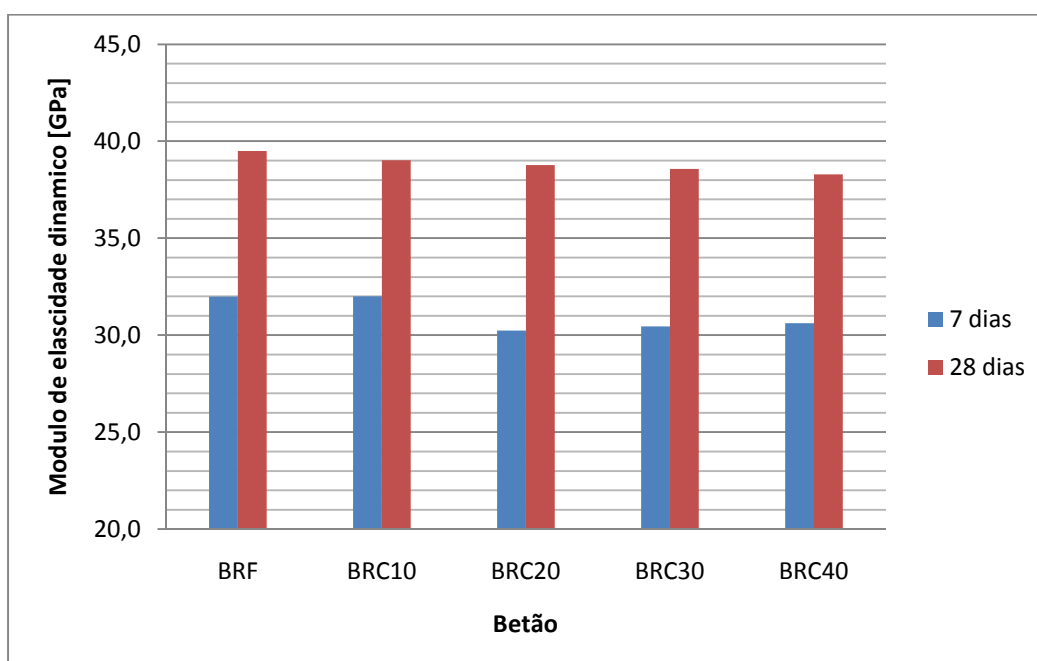


Figura 4.10 - Resultados médios do módulo de elasticidade

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que o módulo de elasticidade foi pouco afectado pela incorporação de agregados grossos reciclados, registando-se uma redução máxima de 3,08% aos 28 dias, para o betão BRC40.

Não é possível estabelecer uma relação entre a incorporação de agregados grossos reciclados e o aumento do módulo de elasticidade dinâmico entre os 7 e os 28 dias, visto existir uma variação não uniforme nos diferentes betões. Mas de uma forma geral, após 7 dias, os betões analisados apresentavam um módulo de elasticidade de aproximadamente 80% do valor medido aos 28 dias.

Capítulo 5- Conclusões

A crescente consciencialização ambiental da população mundial conduziu a que se percebesse que o elevado consumo de recursos naturais, induzido pela actividade humana, não é, neste momento, sustentável. Mais especificamente, a indústria da construção é uma actividade que não só consome grande parte destes recursos, como o depósito e tratamento dos resíduos inerentes aos seus processos acarretam graves consequências ambientais e económicas. Torna-se, então, imprescindível combater esta situação, procurando soluções que proporcionem o reaproveitamento e reciclagem de resíduos originados pela construção e demolição. Uma forma de aproveitamento destes resíduos é a reciclagem, transformando-os em agregados reciclados e reutilizando-os na própria construção civil.

Por outro lado, o betão auto-compactável é um avanço na tecnologia dos materiais de construção, pois minimiza o tempo de betonagem, além de ruídos, mão-de-obra, entre outras vantagens já avaliadas. Entretanto, não se tem experiência do uso dos agregados reciclados na produção de BAC, uma vez que a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados pode gerar alterações em algumas propriedades.

Posto isto, foi no sentido de contribuir para o aprofundamento do conhecimento das propriedades do BAC, que decorreu a presente investigação, que teve como objectivo avaliar as propriedades do BAC com a incorporação de agregados grossos reciclados.

Com a realização do levantamento do estado de arte, ficou patente a pouca informação e investigação, no que se refere à influência da incorporação de agregados grossos reciclados no BAC. Depois de elaborada a fase experimental e obtido os resultados dos diversos ensaios chegou-se as seguintes conclusões:

No que diz respeito ao betão no estado fresco, a variação notada durante os ensaios, foi a necessidade de acrescentar mais água à mistura, nos betões com agregados reciclados, quando comparado com o betão sem agregados reciclados. Esta necessidade de aumento de água, pode ser explicada a partir dos altos valores que os agregados reciclados apresentaram, em termos de absorção de água, quando comparados com os valores dos agregados naturais. Este aumento de água

Relativamente as massas volúmicas no betão em estado endurecido, verificou-se uma pequena perda de peso com o aumento da incorporação dos agregados reciclados. Esta perda pode ser explicada a partir dos baixos valores que os agregados reciclados apresentaram, em termos de massa volúmica, quando comparados com os valores dos agregados naturais.

Em relação as resistências a compressão, houve uma perda de resistência de 0,5%, 1,0%, 1,6% e 2,2% respectivamente aos betões com incorporação de agregados grossos reciclados de 10%, 20%, 30% e 40%, quando comparados com os valores obtidos no betão sem incorporação de agregados reciclados.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade dinâmico, houve uma perda de 1,2 %, 1,8%, 2,4% e 3,1% respectivamente aos betões com incorporação de agregados grossos reciclados de 10%, 20%, 30% e 40%, quando comparados com os valores obtidos no betão sem incorporação de agregados reciclados.

Posto isto e de uma forma geral, pode-se concluir que o betão auto-compactável com incorporação de agregados grossos reciclados é um material viável e com uma boa potencialidade de utilização na indústria da construção, tendo em conta a investigação feita e o tipo de agregado reciclado utilizado.

Capítulo 6- Propostas para trabalhos futuros

A realização do presente trabalho de investigação, permitiu aprofundar o conhecimento das propriedades dos agregados grossos reciclados e da sua incorporação nos betões auto-compactáveis. Após a conclusão desta investigação, subsistem ainda algumas questões a serem esclarecidas e propriedades a avaliar, sendo que a presente dissertação apenas fará sentido caso seja apoiada por investigações futuras que visem determinar com maior precisão as diferenças de desempenho dos betões auto-compactáveis com agregados reciclados face ao betão auto-compactável com agregados naturais.

Neste sentido, julga-se interessante desenvolver, futuramente, os seguintes temas:

- Propriedades do betão auto-compactável com agregados reciclados finos e grossos.
- Propriedades do betão auto-compactável de elevado desempenho, com agregados grossos reciclados.
- Estudo da perda de trabalhabilidade do betão fresco com agregados grossos reciclados.
- Análise das resistências dos betões auto-compactáveis a condições extremas, tais como os ciclos de gelo-degelo e fogo.

Referências bibliográficas

- [1] AFFONSO, F - Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos, «Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro», Rio de Janeiro, 2005.
- [2] ANGULO, S.C - Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição, «Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo», São Paulo, 2000.
- [3] CAIRNS, R.; DI NIRO, G.; - DOLARA, E.-The use of RAC in prefabrication, in: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, pp. 177-187, London: Thomas Telford Pub., 1998
- [4] CAVALCANTI, D. J. H. - Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais, «Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.», Maceió, 2006
- [5] Coutinho, J.S. - Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem, «Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto», 1998)
- [6] DOMONE, P. - Mix design, Self-compacting Concrete. State-of-art report of RLIEM Technical Committee 174-SCC, Edited by A. Skarendahl and O. Petersson, pp 49-65, France 2001
- [7] DIAS, N. C. - Betão auto-compactável branco, «Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil -Especialização em Ciências da Construção», Coimbra 2002
- [8] Especificação LNEC E372-1993 - Água de Amassadura para Betões: Características e Verificação da Conformidade.
- [9] Especificação LNEC E64-1960 - Cimento Portland: Determinação da massa específica.
- [10] Especificação LNEC E245-1971 - Inertes para Argamassas e Betões: Análise granulométrica
- [11] Especificação LNEC E471 - 2006 - Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos

- [12] Especificação LNEC E226-1968 - Betão: Ensaio de compressão.
- [13] Especificação LNEC E248-1971 - Inertes para Argamassas e Betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Areias
- [14] Especificação LNEC E255-1971 - Betões: Preparação de Provetes para Ensaio de Compressão e de Flexão.
- [15] Fonseca, N. M. S., - Betões estruturais com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão, «Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil no IST », Lisboa 2009
- [16] GONÇALVES, A. NEVES. -“Agregados reciclados”, Seminário sobre agregados, LNEC, Lisboa, 2003.
- [17] GONÇALVES, P. C. M., - Betão com agregados reciclados análise comentada da legislação existente, «Dissertação apresentada para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil no IST», Lisboa 2007
- [18] GRDIC et al - Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate, in «Construction and Building Materials», ELSEVIER, 2009
- [19] HO, D.W.S.; SHEINN, A.M.M.; NG, C.C.; TAM, C.T. - The Use of Quarry Dust for SCC Applications, in «Cement and Concrete Research», 32, Pergamon, Elsevier Science Ltd, 2002, p. 505-511,
- [20] HOOD , R. S. S. - Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação , «Dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul»,Porto Alegre , 2006
- [21] INR- Relatório - Gestão de resíduos de construção e demolição em Portugal, Projecto Reagir - Reciclagem de entulho no âmbito da gestão integrada dos resíduos, Montemor-o-Novo, Outubro 2006.
- [22] JSCE, Recommendation for Self-compacting Concrete', concrete engineering Series 31, Japan Society of Civil Engineers, Edited by Teketo Uomoto, Kazumasa Ozawa, Tokyo Agust 1999
- [23] LEITE, M.- Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. «Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul», Porto Alegre. 2001
- [24] LIMA, J. - Proposição de directrizes para produção normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos, «Dissertação de Mestrado em Arquitectura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, » São Carlos,1999.
- [25] LIMBACHIYA, M.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. -Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete, Materials and Structures, 33, RILEM, pp 574-580, 2000

- [26] MIRANDA, L. -Estudo dos factores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000
- [27] NEPOMUCENO, Mi. - Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis, «Dissertação de Douramento apresentada na UBI», Covilhã, 2005.
- [28] Norma Portuguesa NP ENV206: 1993 - Betão: Comportamento, Produção, Colocação e Critérios de Conformidade - Lisboa, Instituto Português da Qualidade, 1993.
- [29] Norma Portuguesa Definitiva - NP 581 - Inertes para Argamassas e Betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Britas e Godos. IGPAI, Lisboa, 1969
- [30] Norma Portuguesa Definitiva - NP 954 - Inertes para Argamassas e Betões: Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Areias. IGPAI, Lisboa, 1973.
- [31] Norma Portuguesa Definitiva - NP 955 - Inertes para Argamassas e Betões: Determinação da Baridade. IGPAI, Lisboa, 1973
- [32] Norma Britânica - BS 1881-203 - Testing concrete -Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete , 1986
- [33] NUNES, Sandra - Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades, «Dissertação de Mestrado apresentada na FEUP», Porto, 2001.
- [34] OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. - Self-Compacting Concrete, in «Structural Concrete: Journal of the fib», vol.1, No. 1, Thomas Telford Ltd, March 2000, p. 3-17
- [35] OKAMURA, H.; OUCHI, M. - Self-Compacting Concrete: Development, Present Use and Future (keynote Lectures), in «Proceedings of the 1 st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete», Sweden, ISBN: 2-912143-09-8, Sept. 1999, p. 3-14.
- [36] SALINAS, L. -«Gestão de resíduos de construção e demolição. Contributo para a avaliação e gestão municipal dos resíduos de construção e demolição em Portugal, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra», Coimbra, 2002.
- [37] SKARENDAHL, A. - Early Age and Hardened 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. 43-46
- [38] VÁZQUEZ, et al.,- Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete, Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, International RILEM Conference, pp. 511-525, Barcelona, 2004.

Anexos

Anexos A - Fichas técnicas

Anexos B - Massa específica dos materiais finos

Anexos C - Massa volúmica dos agregados

Anexos D - Absorção de água dos agregados

Anexos E - Baridade dos agregados grossos

Anexos F - Análise granulométrica dos agregados

Anexos G - Estudo das argamassas

Anexos H - Estudo dos betões

Anexos I - Resistências a compressão e massa volúmica

Anexos J - Módulo de elasticidade

Anexo A

Fichas técnicas

CEM I 42,5R

Cimento Portland



Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40kg

Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

95% a 100% Clínquer Portland
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem e injeção.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.

Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).

Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele.

Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

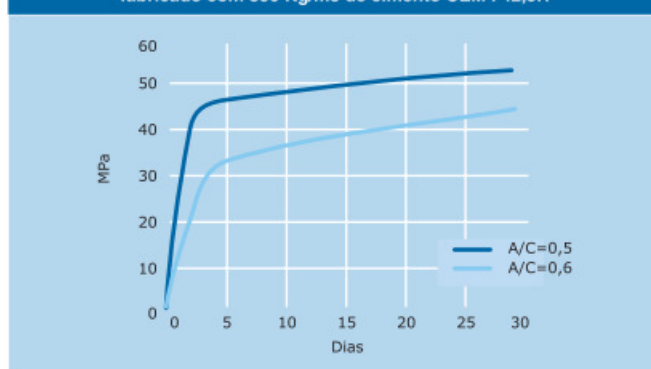
Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias		
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2.
Ponte de Alcácer do Sal.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 936 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

Vendas Centro
Tel. 244 779 500 . Fax. 244 777 455

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

Cimento Branco
Tel. 244 587 700 . Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

E-mail - comercial@secil.pt
Site - www.secil.pt

Ficha de Produto
 Edição de Dezembro 2009
 Nº de identificação: 1.28
 Versão nº 5
 Sika® ViscoCrete® 3005



Sika® ViscoCrete® 3005

Superplastificante de alto desempenho

Descrição do produto	Sika® ViscoCrete® 3005 é um superplastificante da terceira geração para betão e argamassa. Cumprir os requisitos da norma NP EN 934-2: T 3.1/3.2, como superplastificante ou forte redutor de água para betão.
Utilizações	Sika® ViscoCrete® 3005 permite obter uma muito forte plastificação e uma boa manutenção de consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas. Sika® ViscoCrete® 3005 é especialmente adequado para os seguintes casos: <ul style="list-style-type: none"> ■ Betões de Classe igual ou superior a C 30/37, com qualquer consistência, nos quais se pretenda obter uma economia grande de cimento. ■ Betões plásticos com descofragem rápida ou solicitados numa idade curta. ■ Betão muito plástico, fluído ou mesmo autocompactável (BAC) com resistências iniciais melhoradas e com menor custo. ■ Betonagens mais rápidas em época fria. ■ Préfabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ.
Características / Vantagens	Sika® ViscoCrete® 3005 actua sobre as partículas do ligante por dois mecanismos principais: adsorção superficial e efeito espacial. Ambos concorrem para um efeito dispersante muito intenso, permitindo uma elevada redução da água de amassadura ou um aumento marcado da trabalhabilidade. A combinação de vários polímeros permite atingir uma eficácia elevada com qualquer tipo de cimento. Consegue-se assim: <ul style="list-style-type: none"> ■ Um nível de redução de água muito elevado, podendo atingir 20% a 30% conforme a dosagem e a composição; daqui resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compacidade elevada e de permeabilidade muito baixa. ■ Um efeito plastificante intenso, permitindo obter, mesmo com forte redução de água, consistências favoráveis para uma colocação fácil. ■ Uma boa manutenção de consistência, que pode atingir as 2 horas a 20°C, dependendo do tipo de cimento, da consistência inicial e da dosagem de adjuvante. ■ Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em préfabricação, com bom desenvolvimento de resistências. ■ Um comportamento mais favorável quanto à retracção e quanto à fluência. Sika® ViscoCrete® 3005 é isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.
Certificados / Boletins de ensaio	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.
Dados do produto	
Aspecto / Cor	Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.
Fornecimento	210 kg (200 litros); 1.050 kg (1 m ³); granel



Armazenagem e conservação	O produto deve estar armazenado nas embalagens de origem não encetadas e não deterioradas, ao abrigo da radiação do sol e da geada, a temperaturas entre +5 °C e +35 °C. Conserva-se 1 ano após a data de fabrico.
----------------------------------	--

Dados técnicos

Base química	Combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa.
Massa volúmica (23 ± 2°C)	1,05 ± 0,02 kg/dm ³ .
pH (23 ± 2°C)	4,0 ± 1,0.
Teor de sólidos	25,5 ± 1,2%.
Teor em iões cloreto	< 0,1%.

Informação sobre o sistema

Pormenores de aplicação

Consumo / Dosagem	<p>Conforme o objectivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Betão facilmente trabalhável, com optimização do teor em cimento: 0,4% a 0,9% do peso do cimento. ■ Betão quase sem vibração e betão autocompactável (BAC): 1,0% a 1,4% do peso do cimento. ■ Betão de consistências S4 ou S5 com os objectivos de combinar optimização do ligante e manutenção de consistência: 1,0% a 1,6% do peso do cimento. ■ Sika® ViscoCrete® 3005, em condições médias, apresenta uma excelente manutenção da consistência. Se for oportuno aumentar a trabalhabilidade, devido a qualquer dificuldade do trabalho em causa, poderá efectuar-se uma redosagem com Sika® ViscoCrete® 3005, desde que o adjuvante seja bem misturado na autobetoneira ou no misturador e desde que não se ultrapasse um total de 1,8%. ■ Dosagens de conformidade com EN 934-2: 0,6% a 0,8% do peso do cimento.
--------------------------	---

Mistura	<p>Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de 2/3 da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energicamente cerca de 1 minuto/m³; só então será adicionada mais alguma água até à consistência desejada. Este processo conduz ao aproveitamento máximo do adjuvante e permite controlar convenientemente a razão água/ligante. Se o processo não for viável, então adicionar o produto à água de amassadura previamente determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogênea.</p> <p>É importante garantir um tempo mínimo de 1,5 a 2 minutos de amassadura, para obter o efeito pleno do adjuvante.</p> <p>Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia).</p> <p>É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão.</p> <p>No caso de redosagem em obra, deve haver o cuidado de homogeneizar bem o adjuvante na massa do betão. Para isso, recomenda-se uma muito pequena adição de água no recipiente que contém o adjuvante, apenas para reduzir a sua viscosidade e facilitar a sua boa incorporação. O betão deve ser "puxado" acima e o adjuvante deve ser adicionado lentamente, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário, inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneização. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.</p>
----------------	--

Aplicação	Sika® ViscoCrete® 3005 permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação e a cura do betão.
------------------	--

Compatibilidade	<p>Sika® ViscoCrete® 3005 pode ser combinado com os seguintes produtos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Sika® FerroGard® 901. ■ Sika® Pump. ■ Sika® Rapid. ■ Sikacrete®. <p>Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.</p>
Limpeza de ferramentas	Com água.
Importante	<p>Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem óptima do adjuvante e sempre que se altere a composição do betão.</p> <p>Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se.</p> <p>Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.</p>
Nota	<p>Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Ensaios realizados noutras condições para determinação das mesmas características podem dar resultados diferentes devido a circunstâncias que estão fora do nosso controlo.</p>
Risco e segurança	
Medidas de segurança	<p>Mercadoria não perigosa para transporte.</p> <p>Este produto não está classificado de acordo com a legislação da UE.</p> <p>Para mais informações consultar a Ficha de Dados de Segurança do produto e o respectivo rótulo.</p>

"O produto está seguro na Cº Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nº CH00003018LI05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.



Sika Portugal, SA
 R. de Santarém, 113 Tel. +351 22 377 69 00
 4400-292 V. N. Gaia Fax +351 22 370 20 12
 Portugal www.sika.pt



Anexo B

Massa específica dos materiais finos

Massa específica de materiais finos

Método: Densímetro de Le Châtelier

Registo do ensaio laboratorial:

Material:
Cimento: CEM I 42,5R

Proveniência:
SECIL (Outão)

Provete	Massa [g]	Volume [cm ³]	Massa específica ⁽¹⁾ [g/cm ³]
1	M1= 61,0771	V1= 19,45	$\delta_1 = 3,140$
2	M2= 61,6766	V2= 19,65	$\delta_2 = 3,139$
3	M3= 61,8655	V3= 19,70	$\delta_3 = 3,140$

Temperatura a que se realizou o ensaio: 19,5 °C

Resultados:

Valor médio da massa específica do material ⁽²⁾	$\delta = 3,14 \text{ [g/cm}^3 \text{]}$
--	---

(1) – A massa específica em g/cm³ é calculada pela expressão: $\delta_i = \frac{M_i}{V_i}$

(2) – O resultado final é arredondado às centésimas.

Massa específica de materiais finos

Método: Densímetro de Le Châtelier

Registo do ensaio laboratorial:

Material: Fíler calcário – MICRO 100 AB		Proveniência: COMITAL	
Provete	Massa [g]	Volume [cm ³]	Massa específica ⁽¹⁾ [g/cm ³]
1	M1= 51,3374	V1= 18,90	$\delta_1 = 2,716$
2	M2= 51,1825	V2= 18,75	$\delta_2 = 2,730$
3	M3= 51,5806	V3= 18,95	$\delta_3 = 2,722$
Temperatura a que se realizou o ensaio: 18,5 °C			

Resultados:

Valor médio da massa específica do material ⁽²⁾	$\delta = 2,72$ [g/cm³]
(1) – A massa específica em g/cm ³ é calculada pela expressão: $\delta_i = \frac{M_i}{V_i}$	
(2) – O resultado final é arredondado às centésimas.	
Observações: Ensaio realizado de acordo com a Especificação do LNEC E 64-1960.	

Anexo C

Massa volúmica dos agregados

Massa volúmica - areia saturada com a superfície seca
--

Método: Densímetro

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Areia.AF	Proveniência: Betao Liz
-----------------------	----------------------------

M1 – Massa do provete saturado com a superfície seca (*)	M1 = 512,2 [g]
M2 – Massa do densímetro + provete + água (até ao traço de ref.)	M2 = 984,8 [g]
M3 – Massa do densímetro + água (até ao traço de referência)	M3 = 671,9 [g]

Resultados (massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca):

$\delta = \frac{M1}{M1 + M3 - M2} \times 1000$	$\delta = 2570$ [kg/m³]
--	--

(*) – Para um densímetro de 500 ml a massa da amostra deverá ser de aproximadamente de 500 g
--

Massa volúmica - areia saturada com a superfície seca
--

Método: Densímetro

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Areia.AG	Proveniência: Betao Liz
-----------------------	----------------------------

M1 – Massa do provete saturado com a superfície seca (*)	M1 = 520,0 [g]
M2 – Massa do densímetro + provete + água (até ao traço de ref.)	M2 = 992,6 [g]
M3 – Massa do densímetro + água (até ao traço de referência)	M3 = 671,9 [g]

Resultados (massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca):

$\delta = \frac{M1}{M1 + M3 - M2} \times 1000$	$\delta = 2610$ [kg/m³]
--	--

(*) – Para um densímetro de 500 ml a massa da amostra deverá ser de aproximadamente de 500 g
--

Massa volúmica - agregado grosso saturado com a superfície seca

Método: Pesagens hidrostáticas

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Brita.B1	Proveniência: Pedreira Bartolomeu
-----------------------	--------------------------------------

M1 – Massa do provete saturado com a superfície seca (*)	M1 = 1091,0 [g]
M2 – Massa do cesto de rede vazio, imerso	M2 = 0,0 [g]
M3 – Massa do cesto de rede + provete, imerso	M3 = 687,9 [g]

Resultados (massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca):

$\delta = \frac{M1}{M1 + M2 - M3} \times 1000$	$\delta = 2710$ [kg/m³]
--	--

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Provete (g)
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Massa volúmica - agregado grosso saturado com a superfície seca

Método: Pesagens hidrostáticas

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Brita.B2	Proveniência: Pedreira Bartolomeu
-----------------------	--------------------------------------

M1 – Massa do provete saturado com a superfície seca (*)	M1 = 1373,7 [g]
M2 – Massa do cesto de rede vazio, imerso	M2 = 0,0 [g]
M3 – Massa do cesto de rede + provete, imerso	M3 = 865,6 [g]

Resultados (massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca):

$\delta = \frac{M1}{M1 + M2 - M3} \times 1000$	$\delta = 2700$ [kg/m³]
--	--

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Provete (g)
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Massa volúmica - agregado grosso saturado com a superfície seca**Método:** Pesagens hidrostáticasRegisto do ensaio laboratorial:

Agregado: Brita.BR1	Proveniência: Reciclagem
------------------------	-----------------------------

M1 – Massa do provete saturado com a superfície seca ^(*)	M1 = 1340,1[g]
M2 – Massa do cesto de rede vazio, imerso	M2 = 0,0 [g]
M3 – Massa do cesto de rede + provete, imerso	M3 = 800,8[g]

Resultados (massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca):

$\delta = \frac{M1}{M1 + M2 - M3} \times 1000$	$\delta = 2485$ [kg/m³]
--	--

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Provete (g)
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Massa volúmica - agregado grosso saturado com a superfície seca

Método: Pesagens hidrostáticas

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Brita.BR2	Proveniência: Reciclagem
------------------------	-----------------------------

M1 – Massa do provete saturado com a superfície seca (*)	M1 = 1353,9 [g]
M2 – Massa do cesto de rede vazio, imerso	M2 = 0,0 [g]
M3 – Massa do cesto de rede + provete, imerso	M3 = 814,3[g]

Resultados (massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca):

$\delta = \frac{M1}{M1 + M2 - M3} \times 1000$	$\delta = 2509$ [kg/m³]
--	--

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Provete (g)
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Anexo D

Absorção de água dos agregados

Absorção de água do agregado para betão

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Areia.AF	Proveniência: Betão Liz
-----------------------	----------------------------

M1 – Massa do provete saturado, por imersão em água durante 24 horas, apresentando-se com a superfície seca (*).	M1 = 1092,3 [g]
M2 - Massa do provete após secagem em estufa a 105 °C até massa constante.	M2 = 1088,9 [g]

Resultados (Absorção de água do agregado para betão):

$A\% = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$	A% = 0,31
---------------------------------------	------------------

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Provete (g)
≤ 4,76	500
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Absorção de água do agregado para betão

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Areia.AG	Proveniência: Betao Liz
-----------------------	----------------------------

M1 – Massa do provete saturado, por imersão em água durante 24 horas, apresentando-se com a superfície seca (*).	M1 = 1098,8 [g]
M2 - Massa do provete após secagem em estufa a 105 °C até massa constante.	M2 = 1094,2 [g]

Resultados (Absorção de água do agregado para betão):

$A\% = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$	A% = 0,42
---------------------------------------	------------------

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Provete (g)
≤ 4,76	500
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Absorção de água do agregado para betão

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Brita.B1	Proveniência: Pedreira Bartolomeu
-----------------------	--------------------------------------

M1 – Massa do provete saturado, por imersão em água durante 24 horas, apresentando-se com a superfície seca (*).	M1 = 1091,0 [g]
M2 - Massa do provete após secagem em estufa a 105 °C até massa constante.	M2 = 1089,4 [g]

Resultados (Absorção de água do agregado para betão):

$A\% = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$	A% = 0,15
---------------------------------------	------------------

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Provete (g)
≤ 4,76	500
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Absorção de água do agregado para betão

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Brita.B2	Proveniência: Pedreira Bartolomeu
-----------------------	--------------------------------------

M1 – Massa do provete saturado, por imersão em água durante 24 horas, apresentando-se com a superfície seca (*).	M1 = 1373,7 [g]
M2 - Massa do provete após secagem em estufa a 105 °C até massa constante.	M2 = 1371,8 [g]

Resultados (Absorção de água do agregado para betão):

$A\% = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$	A% = 0,14
---------------------------------------	------------------

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Proвете (g)
≤ 4,76	500
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Absorção de água do agregado para betão

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Brita.BR1	Proveniência: Reciclagem
------------------------	-----------------------------

M1 – Massa do provete saturado, por imersão em água durante 24 horas, apresentando-se com a superfície seca (*).	M1 = 1340,1 [g]
M2 - Massa do provete após secagem em estufa a 105 °C até massa constante.	M2 = 1287,8 [g]

Resultados (Absorção de água do agregado para betão):

$A\% = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$	A% = 4,1
---------------------------------------	-----------------

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Proвете (g)
≤ 4,76	500
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Absorção de água do agregado para betão

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: Brita.BR2	Proveniência: Reciclagem
------------------------	-----------------------------

M1 – Massa do provete saturado, por imersão em água durante 24 horas, apresentando-se com a superfície seca (*).	M1 = 1353,9 [g]
M2 - Massa do provete após secagem em estufa a 105 °C até massa constante.	M2 = 1301,2 [g]

Resultados (Absorção de água do agregado para betão):

$A\% = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$	A% = 4,05
---------------------------------------	------------------

(*)

Máxima dimensão do agregado (mm)	Massa mínima do Provete (g)
≤ 4,76	500
19,1	1000
25,4	2000
38,1	3000

Anexo E

Baridade dos agregados grossos

<p>Baridade (Agregado seco compactado)</p>

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: B1	Proveniência: Pedreira Bartolomeu
--------------	--------------------------------------

V – Volume do recipiente (*).	V = 3 [dm ³]
M1 – Massa do recipiente.	M1 = 2,7 [kg]
M2 - Massa do recipiente + agregado seco compactado.	M2 = 7,3[kg]

Resultados (Baridade com o agregado compactado):

$B = \frac{M2 - M1}{V} \times 1000$	B = 1520 [kg/m³]
-------------------------------------	------------------------------------

(*)	
Máxima dimensão do agregado (mm)	Capacidade nominal do recipiente (dm ³)
≤ 12,7	3
19,0; 25,4	10
38,1	15

<p>Baridade (Agregado seco compactado)</p>

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: B2	Proveniência: Pedreira Bartolomeu
--------------	--------------------------------------

V – Volume do recipiente (*).	V = 3 [dm ³]
M1 – Massa do recipiente.	M1 = 2,7 [kg]
M2 - Massa do recipiente + agregado seco compactado.	M2 = 7,3[kg]

Resultados (Baridade com o agregado compactado):

$B = \frac{M2 - M1}{V} \times 1000$	B = 1540 [kg/m³]
-------------------------------------	------------------------------------

(*)	
Máxima dimensão do agregado (mm)	Capacidade nominal do recipiente (dm ³)
≤ 12,7	3
19,0; 25,4	10
38,1	15

<p>Baridade (Agregado seco compactado)</p>

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: BR1	Proveniência: Reciclagem
---------------	-----------------------------

V – Volume do recipiente (*).	V = 3 [dm ³]
M1 – Massa do recipiente.	M1 = 2,7 [kg]
M2 - Massa do recipiente + agregado seco compactado.	M2 = 7,08[kg]

Resultados (Baridade com o agregado compactado):

$B = \frac{M2 - M1}{V} \times 1000$	B = 1460 [kg/m³]
-------------------------------------	------------------------------------

(*)	
Máxima dimensão do agregado (mm)	Capacidade nominal do recipiente (dm ³)
≤ 12,7	3
19,0; 25,4	10
38,1	15

<p>Baridade (Agregado seco compactado)</p>

Registo do ensaio laboratorial:

Agregado: BR2	Proveniência: Reciclagem
---------------	-----------------------------

V – Volume do recipiente (*).	V = 3 [dm ³]
M1 – Massa do recipiente.	M1 = 2,7 [kg]
M2 - Massa do recipiente + agregado seco compactado.	M2 = 7,05[kg]

Resultados (Baridade com o agregado compactado):

$B = \frac{M2 - M1}{V} \times 1000$	<p>B = 1460 [kg/m³]</p>
-------------------------------------	---

(*)	
Máxima dimensão do agregado (mm)	Capacidade nominal do recipiente (dm ³)
≤ 12,7	3
19,0; 25,4	10
38,1	15

Anexo F

Análise granulométrica dos agregados

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

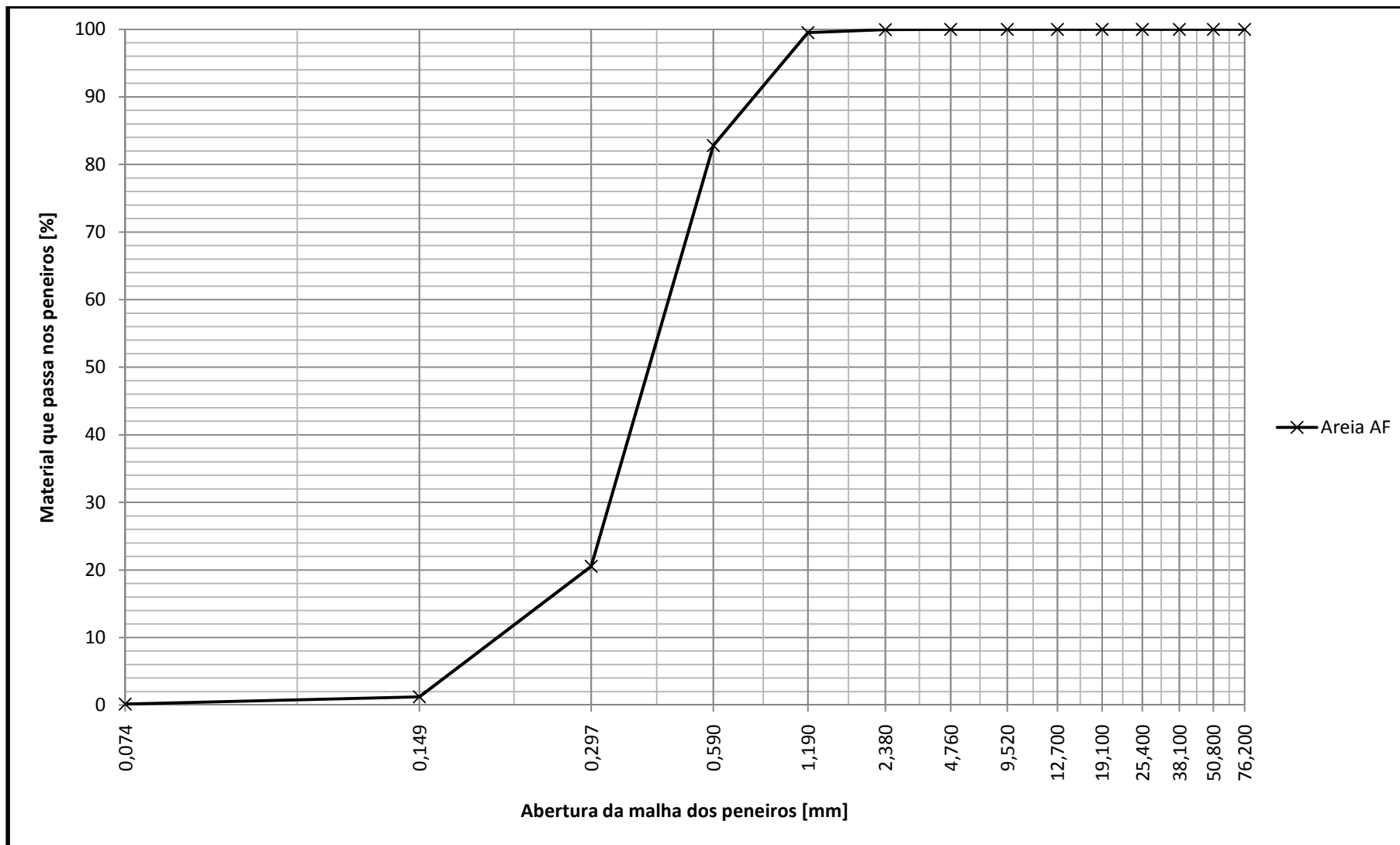
Agregado: Areia.AF	Proveniência: Betao Liz
-----------------------	----------------------------

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	0,00	0,00	100,00	0,00
3/8"	9,52	0,00	0,00	100,00	0,00
nº 4	4,76	0,00	0,00	100,00	0,00
nº 8	2,38	0,62	0,10	99,90	0,10
nº 16	1,190	2,50	0,40	99,50	0,50
nº 30	0,590	104,20	16,70	82,80	17,20
nº 50	0,297	388,75	62,30	20,50	79,50
nº 100	0,149	120,45	19,30	1,20	98,80
nº 200	0,074	6,25	1,00	0,20	99,80
Resíduo		0,62	0,10	0,10	99,90
Totais		624,00	100,0		

(*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do inerte: 1,960



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

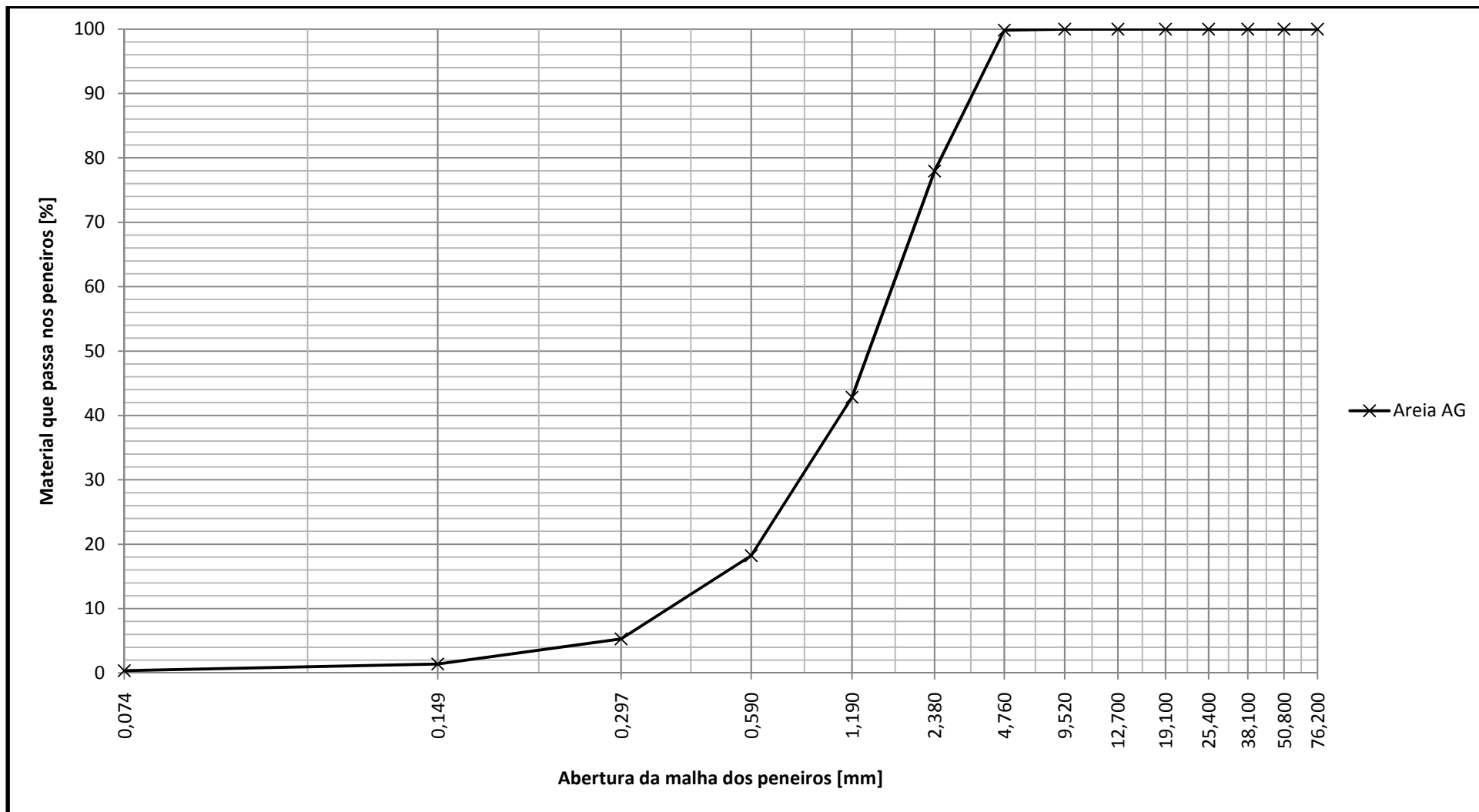
Agregado: Areia.AG	Proveniência: Betao Liz
-----------------------	----------------------------

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	0,00	0,00	100,00	0,00
3/8"	9,52	0,00	0,00	100,00	0,00
n° 4	4,76	2,10	0,15	99,85	0,15
n° 8	2,38	297,80	21,89	77,95	22,05
n° 16	1,190	478,00	35,14	42,81	57,19
n° 30	0,590	334,50	24,59	18,22	81,78
n° 50	0,297	175,90	12,93	5,29	94,71
n° 100	0,149	52,80	3,88	1,41	98,59
n° 200	0,074	14,20	1,04	0,37	99,63
Resíduo		5,00	0,37	0,00	100,00
Totais		1360,30	100,00		

(*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do inerte: 3,545



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Agregado:

Brita: B1

Proveniência:

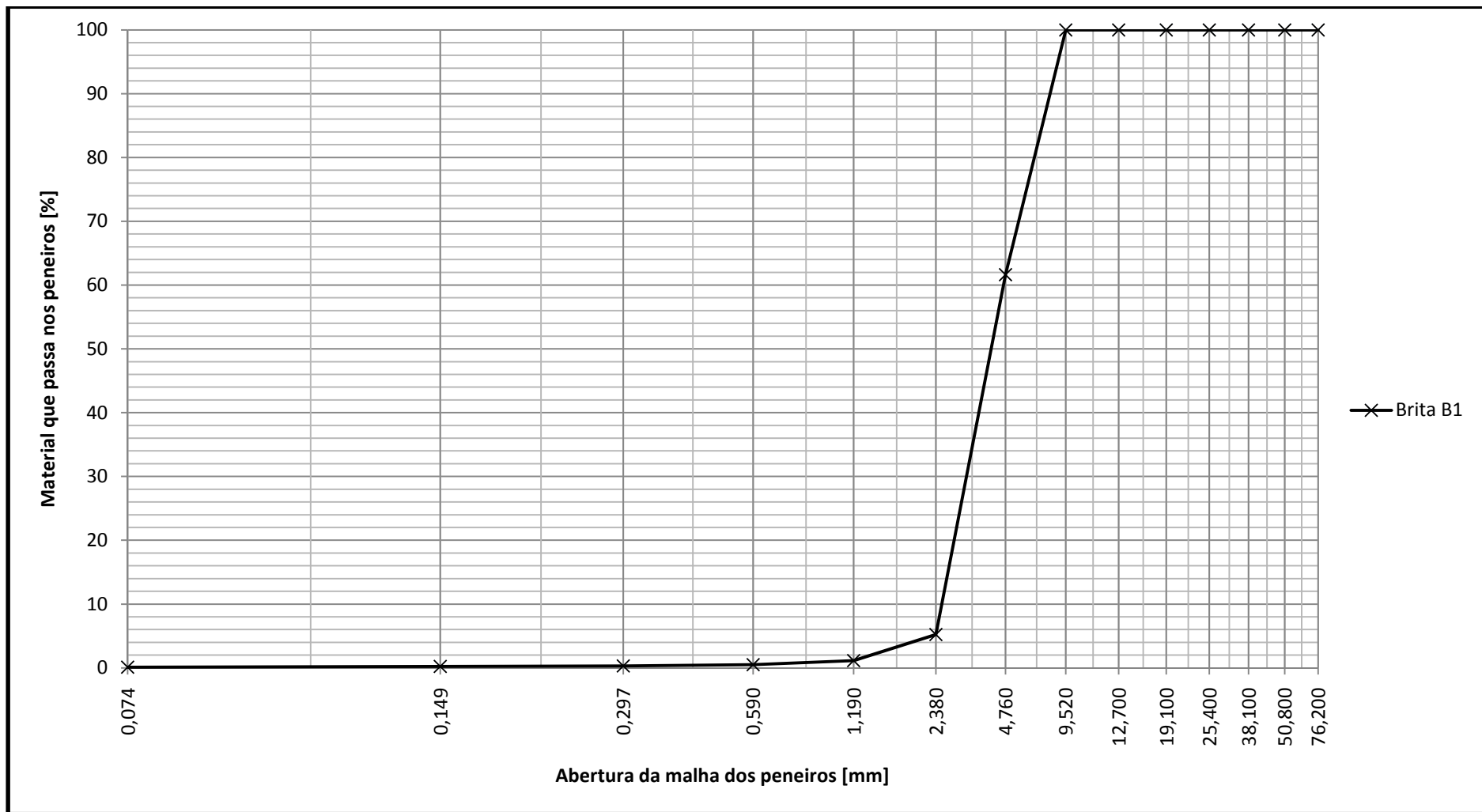
Pedreira Bartolomeu

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	0,00	0,00	100,00	0,00
3/8"	9,52	0,00	0,00	100,00	0,00
n° 4	4,76	993,00	38,39	61,61	38,39
n° 8	2,38	1459,00	56,41	5,20	94,80
n° 16	1,190	105,50	4,08	1,13	98,87
n° 30	0,590	16,50	0,64	0,49	99,51
n° 50	0,297	4,80	0,19	0,30	99,70
n° 100	0,149	2,50	0,10	0,20	99,80
n° 200	0,074	2,20	0,09	0,12	99,88
Resíduo		3,10	0,12	0,00	100,00
Totais		2586,60	100,00		

(*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de
finura

Módulo de finura do inerte: 5,311



ÁLISE GRANULOMÉTRICA

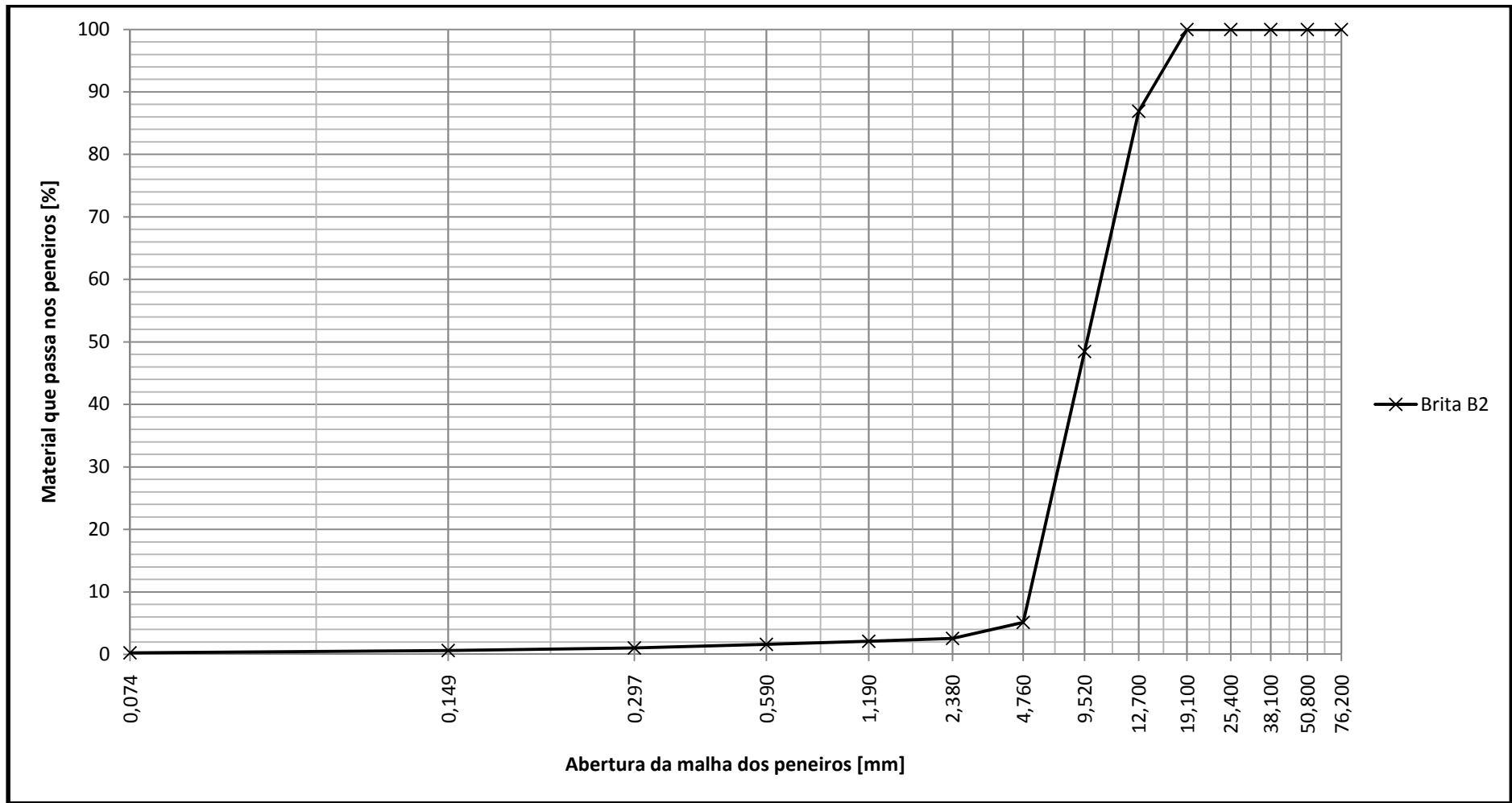
Agregado: Brita: B2	Proveniência: Pedreira Bartolomeu
------------------------	--------------------------------------

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	400,90	13,10	86,90	13,10
3/8"	9,52	1175,30	38,42	48,48	51,52
n° 4	4,76	1327,00	43,38	5,10	94,90
n° 8	2,38	77,30	2,53	2,58	97,42
n° 16	1,190	14,60	0,48	2,10	97,90
n° 30	0,590	14,60	0,48	1,62	98,38
n° 50	0,297	17,40	0,57	1,05	98,95
n° 100	0,149	13,70	0,45	0,60	99,40
n° 200	0,074	10,40	0,34	0,26	99,74
Resíduo		8,10	0,26	0,00	100,00
Totais		3059,30	100,00		

(*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do inerte: 6,385



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

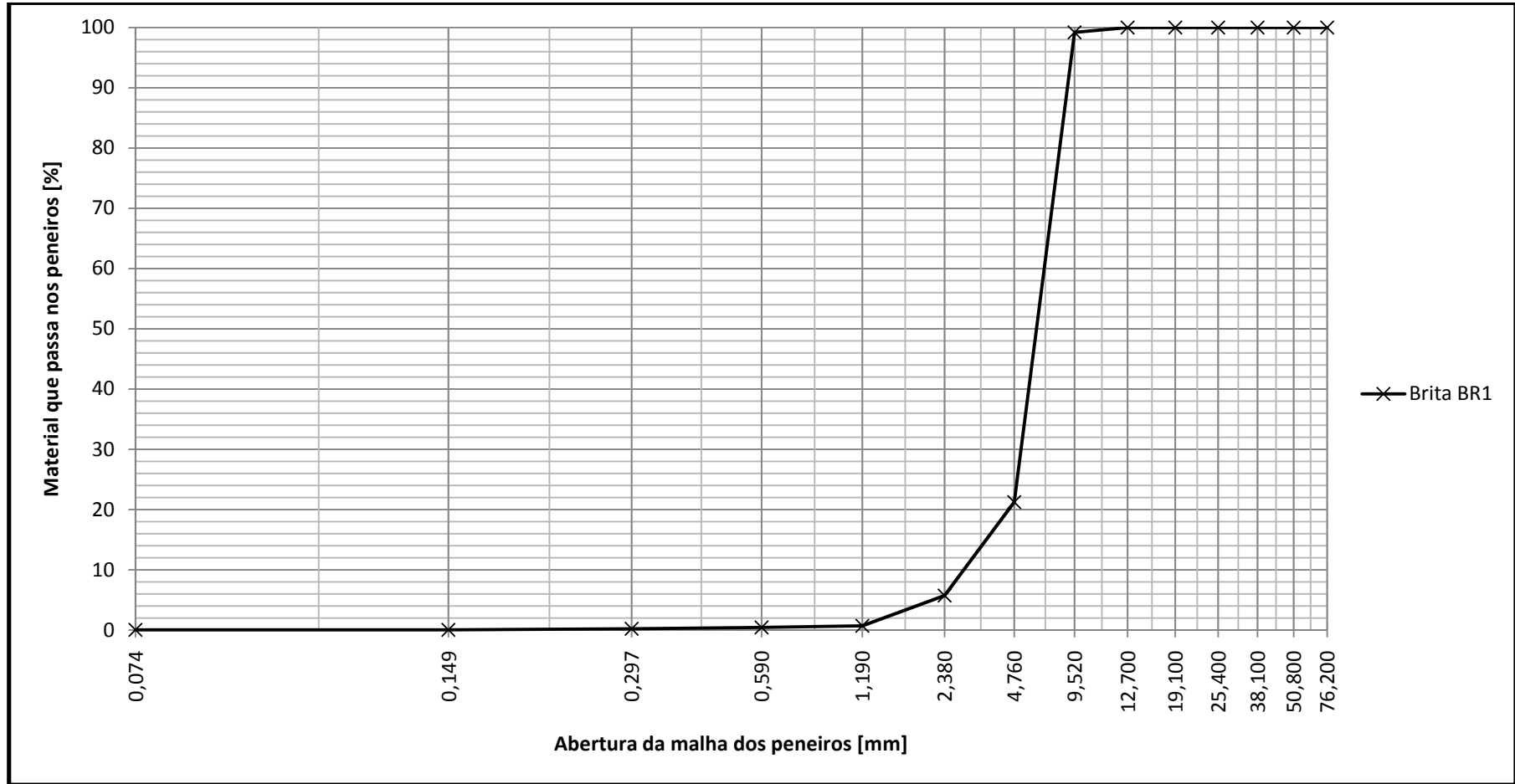
Agregado: Brita BR1	Proveniência: Reciclagem
------------------------	-----------------------------

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	0,00	0,00	100,00	0,00
3/8"	9,52	19,90	0,80	99,20	0,80
n° 4	4,76	1936,20	77,95	21,25	78,75
n° 8	2,38	385,20	15,51	5,74	94,26
n° 16	1,190	124,10	5,00	0,74	99,26
n° 30	0,590	7,50	0,30	0,44	99,56
n° 50	0,297	4,70	0,19	0,25	99,75
n° 100	0,149	4,70	0,19	0,06	99,94
n° 200	0,074	0,20	0,01	0,05	99,95
Resíduo		1,30	0,05	0,00	100,00
Totais		2483,80	100,00		

(*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do inerte: 5,723



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

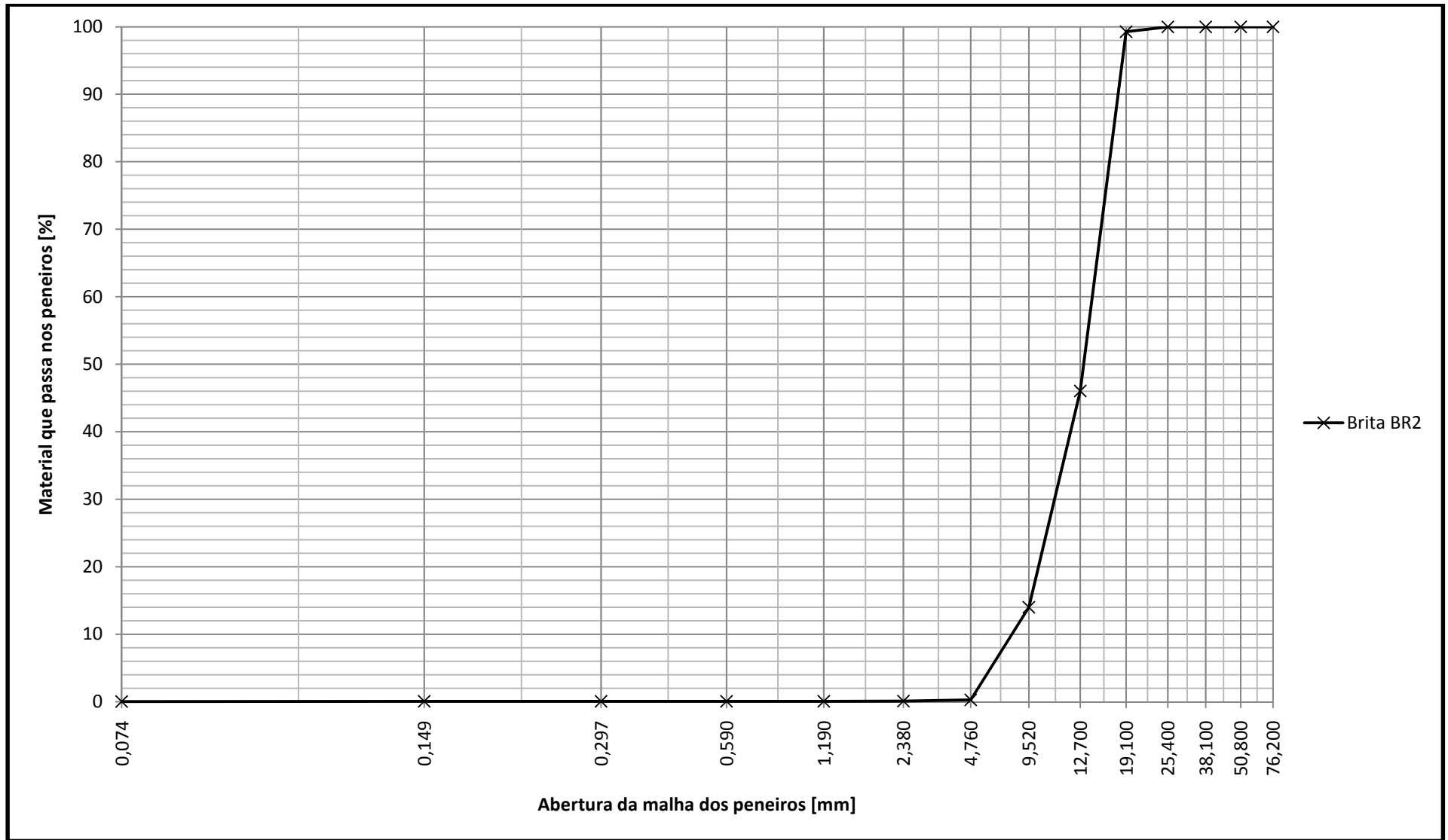
Agregado: Brita BR2	Proveniência: Reciclagem
------------------------	-----------------------------

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	19,50	0,73	99,27	0,73
(*) 1/2"	(*)12,70	1422,90	53,25	46,02	53,98
3/8"	9,52	856,30	32,04	13,98	86,02
n° 4	4,76	366,00	13,70	0,28	99,72
n° 8	2,38	4,50	0,17	0,12	99,88
n° 16	1,190	0,90	0,03	0,08	99,92
n° 30	0,590	0,30	0,01	0,07	99,93
n° 50	0,297	0,30	0,01	0,06	99,94
n° 100	0,149	0,30	0,01	0,05	99,95
n° 200	0,074	0,60	0,02	0,03	99,97
Resíduo		0,70	0,03	0,00	100,00
Totais		2672,30	100,00		

(*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do inerte: 6,861



Anexo G

Estudos das argamassas

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS

Identificação da argamassa
A1

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
28-04-2010

Parâmetros da composição		
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
0,80	0,70	0,75

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,40	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³				
δs1	δs2	---	---	---
2570	2610	---	---	---

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³				
δsp	---	---	---	---
1050	---	---	---	---

Abertura da malha (mm)	AF	AG	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

δp= 2888,00 kg/m ³
Vsp/Vp= 0,020629 m ³ /m ³
Vp= 0,336629 m ³ /m ³
Vw= 0,23564 m ³ /m ³
Vsp= 0,006944 m ³ /m ³
Vs= 0,420786 m ³ /m ³

Quantidades para um volume de: 1000,00 litros	
C1= 422,8 kg	
C2= 0,0 kg	<u>Massa total, em kg</u>
CV= 0,0 kg	2299,4
MS= 0,0 kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>
FC= 549,4 kg	0,557
FG= 0,0 kg	<u>Razão água/cimento</u>
W= 235,6 litros	0,557
Sp= 6,94 litros	<u>Razão água/finos</u>
S1= 897,6 kg	0,242
S2= 186,7 kg	

Quantidades para um volume de: 1,60 litros	
C1= 676,5 g	
C2= 0,0 g	<u>Massa total, em g</u>
CV= 0,0 g	3679,0
MS= 0,0 g	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>
FC= 879,0 g	0,557
FG= 0,0 g	<u>Razão água/cimento</u>
W= 377,0 ml	0,557
Sp= 11,11 ml	<u>Razão água/finos</u>
S1= 1436,1 g	0,242
S2= 298,7 g	

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS

Identificação da argamassa
A2

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
28-04-2010

Parâmetros da composição		
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
0,80	0,70	0,30

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,40	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³				
δs1	δs2	---	---	---
2570	2610	---	---	---

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³				
δsp	---	---	---	---
1050	---	---	---	---

Abertura da malha (mm)	AF	AG	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

δp=	2888,00 kg/m ³
Vsp/Vp=	0,008251 m ³ /m ³
Vp=	0,338038 m ³ /m ³
Vw=	0,236626 m ³ /m ³
Vsp=	0,002789 m ³ /m ³
Vs=	0,422547 m ³ /m ³

Quantidades para um volume de:		1000,00 litros
C1=	424,6 kg	
C2=	0,0 kg	<u>Massa total, em kg</u>
CV=	0,0 kg	2304,6
MS=	0,0 kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>
FC=	551,7 kg	0,557
FG=	0,0 kg	<u>Razão água/cimento</u>
W=	236,6 litros	0,557
Sp=	2,79 litros	<u>Razão água/finos</u>
S1=	901,3 kg	0,242
S2=	187,5 kg	

Quantidades para um volume de:		1,60 litros
C1=	679,3 g	
C2=	0,0 g	<u>Massa total, em g</u>
CV=	0,0 g	3687,4
MS=	0,0 g	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>
FC=	882,7 g	0,557
FG=	0,0 g	<u>Razão água/cimento</u>
W=	378,6 ml	0,557
Sp=	4,46 ml	<u>Razão água/finos</u>
S1=	1442,1 g	0,242
S2=	300,0 g	

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS

Identificação da argamassa
A3

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
28-04-2010

Parâmetros da composição		
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
0,80	0,70	0,35

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,40	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³				
δs1	δs2	---	---	---
2570	2610	---	---	---

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³				
δsp	---	---	---	---
1050	---	---	---	---

Abertura da malha (mm)	AF	AG	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

δp= 2888,00 kg/m ³
Vsp/Vp= 0,009627 m ³ /m ³
Vp= 0,33788 m ³ /m ³
Vw= 0,236516 m ³ /m ³
Vsp= 0,003253 m ³ /m ³
Vs= 0,422351 m ³ /m ³

Quantidades para um volume de:	1000,00 litros
C1=	424,4 kg
C2=	0,0 kg
CV=	0,0 kg
MS=	0,0 kg
FC=	551,4 kg
FG=	0,0 kg
W=	236,5 litros
Sp=	3,25 litros
S1=	900,9 kg
S2=	187,4 kg
	Massa total, em kg
	2304,0
	Razão água/(mat. cimentíceos)
	0,557
	Razão água/cimento
	0,557
	Razão água/finos
	0,242

Quantidades para um volume de:	1,60 litros
C1=	679,0 g
C2=	0,0 g
CV=	0,0 g
MS=	0,0 g
FC=	882,3 g
FG=	0,0 g
W=	378,4 ml
Sp=	5,20 ml
S1=	1441,5 g
S2=	299,8 g
	Massa total, em g
	3686,5
	Razão água/(mat. cimentíceos)
	0,557
	Razão água/cimento
	0,557
	Razão água/finos
	0,242

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS

Identificação da argamassa
A4

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
28-04-2010

Parâmetros da composição		
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
0,80	0,70	0,40

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,40	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³				
δs1	δs2	---	---	---
2570	2610	---	---	---

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³				
δsp	---	---	---	---
1050	---	---	---	---

Abertura da malha (mm)	AF	AG	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

δp= 2888,00 kg/m³
 Vsp/Vp= 0,011002 m³/m³
 Vp= 0,337724 m³/m³
 Vw= 0,236406 m³/m³
 Vsp= 0,003716 m³/m³
 Vs= 0,422154 m³/m³

Quantidades para um volume de: 1000,00 litros	
C1= 424,2 kg	
C2= 0,0 kg	<u>Massa total, em kg</u>
CV= 0,0 kg	2303,5
MS= 0,0 kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>
FC= 551,2 kg	0,557
FG= 0,0 kg	<u>Razão água/cimento</u>
W= 236,4 litros	0,557
Sp= 3,72 litros	<u>Razão água/finos</u>
S1= 900,5 kg	0,242
S2= 187,3 kg	

Quantidades para um volume de: 1,60 litros	
C1= 678,7 g	
C2= 0,0 g	<u>Massa total, em g</u>
CV= 0,0 g	3685,5
MS= 0,0 g	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>
FC= 881,9 g	0,557
FG= 0,0 g	<u>Razão água/cimento</u>
W= 378,3 ml	0,557
Sp= 5,94 ml	<u>Razão água/finos</u>
S1= 1440,8 g	0,242
S2= 299,7 g	

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS

Identificação da argamassa
A5

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
28-04-2010

Parâmetros da composição		
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
0,80	0,70	0,375

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,40	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³				
δs1	δs2	---	---	---
2570	2610	---	---	---

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³				
δsp	---	---	---	---
1050	---	---	---	---

Abertura da malha (mm)	AF	AG	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

δp= 2888,00 kg/m ³
Vsp/Vp= 0,010314 m ³ /m ³
Vp= 0,337802 m ³ /m ³
Vw= 0,236461 m ³ /m ³
Vsp= 0,003484 m ³ /m ³
Vs= 0,422252 m ³ /m ³

<p>Quantidades para um volume de: 1000,00 litros</p> <p>C1= 424,3 kg</p> <p>C2= 0,0 kg</p> <p>CV= 0,0 kg</p> <p>MS= 0,0 kg</p> <p>FC= 551,3 kg</p> <p>FG= 0,0 kg</p> <p>W= 236,5 litros</p> <p>Sp= 3,48 litros</p> <p>S1= 900,7 kg</p> <p>S2= 187,4 kg</p>	<p><u>Massa total, em kg</u></p> <p>2303,8</p> <p><u>Razão água/(mat. cimentícios)</u></p> <p>0,557</p> <p><u>Razão água/cimento</u></p> <p>0,557</p> <p><u>Razão água/finos</u></p> <p>0,242</p>
---	---

<p>Quantidades para um volume de: 1,60 litros</p> <p>C1= 678,8 g</p> <p>C2= 0,0 g</p> <p>CV= 0,0 g</p> <p>MS= 0,0 g</p> <p>FC= 882,1 g</p> <p>FG= 0,0 g</p> <p>W= 378,3 ml</p> <p>Sp= 5,57 ml</p> <p>S1= 1441,1 g</p> <p>S2= 299,8 g</p>	<p><u>Massa total, em g</u></p> <p>3686,0</p> <p><u>Razão água/(mat. cimentícios)</u></p> <p>0,557</p> <p><u>Razão água/cimento</u></p> <p>0,557</p> <p><u>Razão água/finos</u></p> <p>0,242</p>
---	--

Anexo H

Estudo dos betões

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS

Identificação do betão
BRF

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
08-06-2010

Parâmetros da composição				
Vm/Vg	Vv (m ³)	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
2,250	0,030	0,800	0,700	0,375

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,400	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³				
δs1	δs2	δg1	δg2	δg3
2570	2610	2710	2700	0

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³				
δsp1	---	---	---	---
1050	---	---	---	---

δp= 2888,00 kg/m ³
Vsp/vp= 0,010314
Vg= 0,298462 m ³ /m ³
Vm= 0,671538 m ³ /m ³
Vp= 0,226847 m ³ /m ³
Vw= 0,158793 m ³ /m ³
Vsp= 0,00234 m ³ /m ³
Vs= 0,283559 m ³ /m ³
Vs/Vm= 0,422252

Abertura da malha (mm)	Areia 0/1	Areia 0/5	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

Abertura da malha (mm)	B1	B2	-	Mistura (Curva Real)
	g1	g2	g3	
	0,57	0,43	0,00	
agem de passados				
38,100	100,00	100,00	0,00	100,00
25,400	100,00	100,00	0,00	100,00
19,100	100,00	100,00	0,00	100,00
12,700	100,00	86,90	0,00	94,37
9,520	100,00	48,48	0,00	77,85
4,760	61,61	5,10	0,00	37,31
2,380	5,20	2,58	0,00	4,07
1,190	1,13	2,10	0,00	1,54
0,590	0,49	1,62	0,00	0,97
0,297	0,30	1,05	0,00	0,62
0,149	0,20	0,60	0,00	0,38
0,074	0,12	0,26	0,00	0,18
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura				
	5,311	6,385	9,000	5,772

Quantidades para uma amassadura de: 1000,00 litros	
C1= 284,92 kg	
C2= 0,00 kg	
CV= 0,00 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,00 kg	2354,6
FC= 370,21 kg	
FG= 0,00 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 158,79 litros	0,557
Sp= 2,34 litros	
S1= 604,86 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 125,82 kg	0,557
G1= 461,03 kg	
G2= 346,51 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 0,00 kg	0,242

Quantidades para uma amassadura de: 25,00 litros	
C1= 7,123 kg	
C2= 0,000 kg	
CV= 0,000 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,000 kg	58,87
FC= 9,255 kg	
FG= 0,000 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 3,970 litros	0,557
Sp= 0,058 litros	
S1= 15,121 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 3,145 kg	0,557
G1= 11,526 kg	
G2= 8,663 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 0,000 kg	0,242

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS

Identificação do betão
BRC10

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
09-06-2010

Parâmetros da composição				
Vm/Vg	Vv (m ³)	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
2,250	0,030	0,800	0,700	0,375

Abertura da malha (mm)	Areia 0/1	Areia 0/5	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,400	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	δg1	δg2	δg3	δg4
2570	2610	2710	2700	2509	2485

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp1					
1050	---	---	---	---	---

δp= 2888,00 kg/m ³
Vsp/vp= 0,010314
Vg= 0,298462 m ³ /m ³
Vm= 0,671538 m ³ /m ³
Vp= 0,226847 m ³ /m ³
Vw= 0,158793 m ³ /m ³
Vsp= 0,00234 m ³ /m ³
Vs= 0,283559 m ³ /m ³
Vs/Vm= 0,422252

Abertura da malha (mm)	B1	B2	BR1	BR2	Mistura (Curva Real)
	g1	g2	g3	g4	
	0,513	0,387	0,095	0,005	
Percentagem de passados					
38,100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,400	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,100	100,00	100,00	100,00	99,42	100,00
12,700	100,00	86,90	100,00	46,17	94,66
9,520	100,00	48,48	99,20	14,13	79,56
4,760	61,61	5,10	21,25	0,43	35,60
2,380	5,20	2,58	5,74	0,27	4,21
1,190	1,13	2,10	0,74	0,23	1,46
0,590	0,49	1,62	0,44	0,22	0,92
0,297	0,30	1,05	0,25	0,21	0,59
0,149	0,20	0,60	0,06	0,20	0,35
0,074	0,12	0,26	0,05	0,18	0,17
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00
Módulos de finura					
	5,311	6,385	5,723	6,849	5,773

Quantidades para uma amassadura de: 1000,00 litros	
C1= 284,92 kg	
C2= 0,00 kg	
CV= 0,00 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,00 kg	2345,0
FC= 370,21 kg	
FG= 0,00 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 158,79 litros	0,557
Sp= 2,34 litros	
S1= 604,86 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 125,82 kg	0,557
G1= 414,93 kg	
G2= 311,86 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 71,14 kg	0,242
G4= 3,71 kg	

Quantidades para uma amassadura de: 25,00 litros	
C1= 7,123 kg	
C2= 0,000 kg	
CV= 0,000 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,000 kg	58,62
FC= 9,255 kg	
FG= 0,000 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 3,970 litros	0,557
Sp= 0,058 litros	
S1= 15,121 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 3,145 kg	0,557
G1= 10,373 kg	
G2= 7,797 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 1,778 kg	0,242
G4= 0,093 kg	

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS

Identificação do betão
BRC20

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
10-06-2010

Parâmetros da composição				
Vm/Vg	Vv (m ³)	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
2,250	0,030	0,800	0,700	0,375

Abertura da malha (mm)	Areia 0/1	Areia 0/5	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,400	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	δg1	δg2	δg3	δg4
2570	2610	2710	2700	2509	2485

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp1					
1050	---	---	---	---	---

δp= 2888,00 kg/m ³
Vsp/vp= 0,010314
Vg= 0,298462 m ³ /m ³
Vm= 0,671538 m ³ /m ³
Vp= 0,226847 m ³ /m ³
Vw= 0,158793 m ³ /m ³
Vsp= 0,00234 m ³ /m ³
Vs= 0,283559 m ³ /m ³
Vs/Vm= 0,422252

Abertura da malha (mm)	B1	B2	BR1	BR2	Mistura (Curva Real)
	g1	g2	g3	g4	
	0,456	0,344	0,190	0,010	
Percentagem de passados					
38,100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,400	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,100	100,00	100,00	100,00	99,42	99,99
12,700	100,00	86,90	100,00	46,17	94,95
9,520	100,00	48,48	99,20	14,13	81,27
4,760	61,61	5,10	21,25	0,43	33,89
2,380	5,20	2,58	5,74	0,27	4,35
1,190	1,13	2,10	0,74	0,23	1,38
0,590	0,49	1,62	0,44	0,22	0,87
0,297	0,30	1,05	0,25	0,21	0,55
0,149	0,20	0,60	0,06	0,20	0,31
0,074	0,12	0,26	0,05	0,18	0,16
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00
Módulos de finura					
	5,311	6,385	5,723	6,849	5,774

Quantidades para uma amassadura de: 1000,00 litros	
C1= 284,92 kg	
C2= 0,00 kg	
CV= 0,00 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,00 kg	2335,4
FC= 370,21 kg	
FG= 0,00 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 158,79 litros	0,557
Sp= 2,34 litros	
S1= 604,86 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 125,82 kg	0,557
G1= 368,83 kg	
G2= 277,21 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 142,28 kg	0,242
G4= 7,42 kg	

Quantidades para uma amassadura de: 25,00 litros	
C1= 7,123 kg	
C2= 0,000 kg	
CV= 0,000 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,000 kg	58,38
FC= 9,255 kg	
FG= 0,000 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 3,970 litros	0,557
Sp= 0,058 litros	
S1= 15,121 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 3,145 kg	0,557
G1= 9,221 kg	
G2= 6,930 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 3,557 kg	0,242
G4= 0,185 kg	

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS

Identificação do betão
BRC30

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
11-06-2010

Parâmetros da composição				
Vm/Vg	Vv (m ³)	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
2,250	0,030	0,800	0,700	0,375

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,400	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	δg1	δg2	δg3	δg4
2570	2610	2710	2700	2509	2485

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp1					
1050	---	---	---	---	---

δp= 2888,00 kg/m ³
Vsp/vp= 0,010314
Vg= 0,298462 m ³ /m ³
Vm= 0,671538 m ³ /m ³
Vp= 0,226847 m ³ /m ³
Vw= 0,158793 m ³ /m ³
Vsp= 0,00234 m ³ /m ³
Vs= 0,283559 m ³ /m ³
Vs/Vm= 0,422252

Abertura da malha (mm)	Areia 0/1	Areia 0/5	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

Abertura da malha (mm)	B1	B2	BR1	BR2	Mistura (Curva Real)
	g1	g2	g3	g4	
	0,399	0,301	0,285	0,015	
Percentagem de passados					
38,100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,400	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,100	100,00	100,00	100,00	99,42	99,99
12,700	100,00	86,90	100,00	46,17	95,25
9,520	100,00	48,48	99,20	14,13	82,98
4,760	61,61	5,10	21,25	0,43	32,18
2,380	5,20	2,58	5,74	0,27	4,49
1,190	1,13	2,10	0,74	0,23	1,29
0,590	0,49	1,62	0,44	0,22	0,81
0,297	0,30	1,05	0,25	0,21	0,51
0,149	0,20	0,60	0,06	0,20	0,28
0,074	0,12	0,26	0,05	0,18	0,14
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00
Módulos de finura					
	5,311	6,385	5,723	6,849	5,775

Quantidades para uma amassadura de: 1000,00 litros	
C1= 284,92 kg	
C2= 0,00 kg	
CV= 0,00 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,00 kg	2325,8
FC= 370,21 kg	
FG= 0,00 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 158,79 litros	0,557
Sp= 2,34 litros	
S1= 604,86 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 125,82 kg	0,557
G1= 322,72 kg	
G2= 242,56 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 213,42 kg	0,242
G4= 11,13 kg	

Quantidades para uma amassadura de: 25,00 litros	
C1= 7,123 kg	
C2= 0,000 kg	
CV= 0,000 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,000 kg	58,14
FC= 9,255 kg	
FG= 0,000 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 3,970 litros	0,557
Sp= 0,058 litros	
S1= 15,121 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 3,145 kg	0,557
G1= 8,068 kg	
G2= 6,064 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 5,335 kg	0,242
G4= 0,278 kg	

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS

Identificação do betão
BRC40

Identificação da mistura de finos
40C1+60FC

Data
14-06-2010

Parâmetros da composição				
Vm/Vg	Vv (m ³)	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
2,250	0,030	0,800	0,700	0,375

Abertura da malha (mm)	Areia 0/1	Areia 0/5	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,83	0,17	
Percentagem de passados			
9,520	100,00	100,00	100,00
4,760	100,00	99,85	99,97
2,380	99,94	77,95	96,20
1,190	99,51	42,81	89,87
0,590	82,79	18,22	71,81
0,297	20,53	5,29	17,94
0,149	1,24	1,41	1,27
0,074	0,16	0,37	0,20
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,960	3,545	2,229

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,400	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	δg1	δg2	δg3	δg4
2570	2610	2710	2700	2509	2485

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp1					
1050	---	---	---	---	---

δp= 2888,00 kg/m ³
Vsp/vp= 0,010314
Vg= 0,298462 m ³ /m ³
Vm= 0,671538 m ³ /m ³
Vp= 0,226847 m ³ /m ³
Vw= 0,158793 m ³ /m ³
Vsp= 0,00234 m ³ /m ³
Vs= 0,283559 m ³ /m ³
Vs/Vm= 0,422252

Abertura da malha (mm)	B1	B2	BR1	BR2	Mistura (Curva Real)
	g1	g2	g3	g4	
	0,342	0,258	0,380	0,020	
Percentagem de passados					
38,100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,400	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,100	100,00	100,00	100,00	99,42	99,99
12,700	100,00	86,90	100,00	46,17	95,54
9,520	100,00	48,48	99,20	14,13	84,69
4,760	61,61	5,10	21,25	0,43	30,47
2,380	5,20	2,58	5,74	0,27	4,63
1,190	1,13	2,10	0,74	0,23	1,21
0,590	0,49	1,62	0,44	0,22	0,76
0,297	0,30	1,05	0,25	0,21	0,47
0,149	0,20	0,60	0,06	0,20	0,25
0,074	0,12	0,26	0,05	0,18	0,13
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00
Módulos de finura					
	5,311	6,385	5,723	6,849	5,775

Quantidades para uma amassadura de: 1000,00 litros	
C1= 284,92 kg	
C2= 0,00 kg	
CV= 0,00 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,00 kg	2316,1
FC= 370,21 kg	
FG= 0,00 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 158,79 litros	0,557
Sp= 2,34 litros	
S1= 604,86 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 125,82 kg	0,557
G1= 276,62 kg	
G2= 207,91 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 284,56 kg	0,242
G4= 14,83 kg	

Quantidades para uma amassadura de: 25,00 litros	
C1= 7,123 kg	
C2= 0,000 kg	
CV= 0,000 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS= 0,000 kg	57,90
FC= 9,255 kg	
FG= 0,000 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W= 3,970 litros	0,557
Sp= 0,058 litros	
S1= 15,121 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2= 3,145 kg	0,557
G1= 6,916 kg	
G2= 5,198 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3= 7,114 kg	0,242
G4= 0,371 kg	

Anexo I

**Resistência à compressão e
Massa volúmica**

Idade	Designação	Massa do provete [Kg]	Dimensões do provete [cm]	Área [cm ²]	Volume do provete [m ³]	Carga máxima de rotura [KN]	Massa volúmica [Kg/m ³]	Massa volúmica Media [Kg/m ³]	Tensão de rotura [Mpa]	Tensão de rotura Media [Mpa]	Desvio padrão	Tensão de rotura final [Mpa]				
7 dias	BRF	8,08	15x15x15	225,00	0,0034	1011	2394	2370	44,9	44,6	0,5	43,8				
		7,92				996	2346		44,3							
	BRC10	8,06				987	2387	2363	43,9	44,3	0,6	43,3				
		7,90				1007	2339		44,7							
	BRC20	8,02				996	2376	2353	44,3	43,9	0,5	43,1				
		7,86				980	2329		43,5							
	BRC30	8,02				984	2376	2353	43,7	43,5	0,3	42,9				
		7,86				973	2329		43,2							
	BRC40	8,01				965	2373	2350	42,9	43,2	0,5	42,5				
		7,85				979	2326		43,5							
	28 dias	BRF				7,96	15x15x15	225,00	0,0034	1243	2360	2360	55,3	54,9	0,4	54,2
						7,88				1225	2336		54,4			
8,04			1239	2383	55,1											
BRC10		7,92	1249	2347	2347	55,5				54,9	0,6	53,9				
		7,84	1223	2323		54,4										
		8,00	1231	2370		54,7										
BRC20		7,88	1228	2334	2334	54,6				54,4	0,4	53,7				
		7,80	1212	2311		53,9										
		7,96	1229	2357		54,6										
BRC30		7,87	1219	2333	2334	54,2				53,8	0,3	53,3				
		7,79	1210	2309		53,8										
		7,96	1205	2359		53,6										
BRC40		7,88	1218	2335	2335	54,1				54,2	0,7	53,0				
		7,80	1237	2312		55,0										
		7,96	1204	2358		53,5										

Anexo J

Módulo de elasticidade

Idade	Designação	Massa volúmica [Kg/m3]	Coefficiente de Poisson	Velocidade de propagação [km/s]	Módulo de elasticidade dinâmico [Gpa]	Modulo de elasticidade dinâmico médio [Gpa]
7 dias	BRF	2394	0,20	3,87	32,20	32,0
				3,83	31,55	
				3,88	32,52	
				3,83	31,55	
		3,90		32,20		
		2346		3,87	31,55	
				3,89	31,87	
				3,92	32,52	
	3,87			32,20		
	BRC10	2387		3,83	31,56	32,0
				3,89	32,52	
				3,83	31,56	
				3,91	32,20	
		2339		3,87	31,56	
				3,89	31,88	
				3,93	32,52	
				3,77	30,41	
	BRC20	2376		3,73	29,81	30,2
				3,79	30,72	
				3,73	29,81	
				3,81	30,42	
		2329		3,77	29,81	
				3,79	30,11	
				3,83	30,72	
				3,79	30,65	
	BRC30	2376		3,75	30,03	30,5
				3,80	30,95	
				3,75	30,03	
				3,82	30,65	
		2329		3,79	30,03	
				3,80	30,34	
				3,84	30,95	
3,80			30,78			
BRC40	2373	3,76	30,17	30,6		
		3,82	31,09			
		3,76	30,17			
		3,83	30,78			
	2326	3,80	30,17			
		3,82	30,48			
		3,85	31,09			

Idade	Designação	Massa volúmica [Kg/m3]	Coefficiente de Poisson	Velocidade de propagação [km/s]	Módulo de elasticidade dinâmico [Gpa]	Modulo de elasticidade dinâmico médio [Gpa]
28 dias	BRF	2360	0,20	4,33	39,83	39,5
				4,29	39,04	
				4,35	40,23	
				4,29	39,04	
		4,35		39,83		
		4,31		39,04		
		4,33		39,43		
		4,37		40,23		
		4,27		39,04		
		4,31		39,83		
		4,27		39,04		
		4,29		39,43		
	BRC10	2347		4,32	39,35	39,0
				4,27	38,57	
				4,34	39,75	
				4,27	38,57	
		2323		4,34	39,35	
				4,29	38,57	
				4,32	38,96	
				4,36	39,75	
		2370		4,25	38,57	
				4,30	39,35	
				4,25	38,57	
				4,27	38,96	
	BRC20	2334		4,31	39,10	38,8
				4,27	38,31	
				4,34	39,49	
				4,27	38,31	
		2311		4,34	39,10	
				4,29	38,31	
4,31			38,70			
4,36			39,49			
2357		4,25	38,31			
		4,29	39,10			
		4,25	38,31			
		4,27	38,70			

Idade	Designação	Massa volúmica [Kg/m ³]	Coefficiente de Poisson	Velocidade de propagação [km/s]	Módulo de elasticidade dinâmico [Gpa]	Modulo de elasticidade dinâmico médio [Gpa]
28 dias	BRC30	2333	0,20	4,30	38,9	38,6
				4,26	38,1	
				4,32	39,3	
				4,26	38,1	
		2309		4,32	38,9	
				4,28	38,1	
				4,30	38,5	
				4,35	39,3	
		2359		4,24	38,1	
				4,28	38,9	
				4,24	38,1	
				4,26	38,5	
	BRC40	2335		4,29	38,6	38,3
				4,24	37,8	
				4,31	39,0	
				4,24	37,8	
		2312		4,31	38,6	
				4,26	37,8	
				4,29	38,2	
				4,33	39,0	
		2358		4,22	37,9	
				4,27	38,6	
				4,22	37,9	
				4,25	38,3	