



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Reologia de Betão Auto-Compactável com Agregados Finos Reciclados da Demolição de Estruturas de Betão

Carlos Miguel da Rosa Silveira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Ciclo de Estudos Integrado)

Orientador: Prof. Doutor Luiz Antonio Pereira de Oliveira

Covilhã, Outubro de 2014

Dedicatória

A todos aqueles que tornaram possível a realização desta dissertação lhes dedico todo o meu trabalho. Com especial carinho para os meus pais.

Agradecimentos

A colaboração de diversas pessoas contribuiu, direta ou indiretamente, para a elaboração desta dissertação. Pretendo assim expressar o meu sincero agradecimento a todas elas.

Quero agradecer primeiramente à minha família, com especial destaque aos meus pais, pelo seu esforço e apoio incondicional que sempre demonstraram, proporcionando-me a realização deste trabalho.

À minha namorada por todo o amor, carinho, amizade, compreensão e apoio que sempre demonstrou.

Aos médicos que me acompanharam na minha doença, principalmente aos neurologistas e neurocirurgiões, e respetivas equipas, que pela sua extraordinária capacidade de desempenhar a sua arte e também pelo seu bom lado humano, me conseguiram devolver saúde e como que uma nova vida.

Agradeço ainda, de uma forma especial, ao meu orientador Prof. Doutor Luiz Oliveira por toda a disponibilidade, auxílio prestado e o incentivo que me deu para a concretização desta dissertação.

Pretendo também agradecer de uma forma geral a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, desde amigos, colegas e funcionários da Universidade da Beira Interior.

Por último, um agradecimento à Universidade da Beira Interior pela formação que me foi concedida, e também pela disponibilização de equipamento e materiais indispensáveis para a realização deste estudo.

Resumo

O betão auto-compactável (BAC) surgiu com a necessidade de se possuir um betão que apresentasse maior homogeneidade, associado a uma melhoria na durabilidade das estruturas, independentemente da qualidade dos trabalhos de compactação em obra. É um material compósito sensível em termos de doseamento dos seus constituintes, o que torna o estudo do seu comportamento reológico de grande importância. Uma das características do BAC é a capacidade de implementação de novos materiais tais como o agregado fino reciclado (AFR). O AFR pode ser obtido a partir da demolição de estruturas de betão. A presente dissertação tem como objetivo a realização de um estudo reológico da fase argamassa de betões auto-compactáveis que incorporam agregados finos reciclados. No programa experimental foram produzidas e ensaiadas duas séries distintas de argamassas. Sendo a série 1 constituída de uma mistura binária de pós (cimento e pó calcário) e a série 2 de uma mistura ternária (cimento, pó calcário e cinza volante). Para a produção das argamassas foi seguido o método de Nepomuceno. Cada uma das séries possuiu cerca de 11 argamassas distintas, onde em 6 foram adicionadas percentagens crescentes e sucessivas de cerca de 10% até ao limite de 50% de AFR, enquanto nas restantes 5 argamassas foram utilizados valores de referência. Em ambas as séries foi produzido um grupo de misturas com incorporação de AFR sem correção de água e superplastificante e um grupo com correções necessárias para atingir o critério de auto-compactabilidade. Em termos gerais, a incorporação crescente de AFR nas argamassas altera o volume de água de amassadura, incrementa o valor da tensão de cedência das argamassas, aumenta a viscosidade, e aumenta as áreas de tixotropia. Estas alterações são no entanto diferentes conforme a mistura seja binária ou ternária. Os objetivos do estudo, que pretendiam avaliar o comportamento reológico da fase argamassa do BAC foram atingidos. Conclui-se que os AFR são viáveis como componente do BAC, embora influenciando o seu comportamento reológico. Entretanto este estudo demonstra os efeitos e por consequência as diretrizes a serem observadas quando dos estudos de dosagem para o BAC.

Palavras-chave

Betão Auto-Compactável, Agregado fino reciclado, Reologia, Tixotropia.

Abstract

The Self-Compacting Concrete (SCC) has emerged from the need of having a concrete with great uniformity, associated with an improvement in the durability of structures, regardless the quality of the compaction work on site. It is a sensitive composite material in terms of its mix constituents, which makes the study of its rheological behavior of great importance. One of the characteristics of SCC is the ability to incorporate new materials such as recycled fine aggregate (RFA). The RFA can be obtained from the demolition of concrete structures. The present dissertation aims the rheological study on mortar phase of the self-compacting concrete incorporating fine recycled aggregates. In the experimental program were produced and tested two different series of mortars. Serie 1 is composed of a binary mix of powders (cement and limestone filler) and serie 2 is a ternary powders mix (cement, limestone filler and fly ash). For the production of the mortars Nepomuceno method was followed. Each serie is composed of about 11 distinct mortars, where in 6 mortars were incorporated successive and increasing percentages of 10% up to 50% of fine recycled aggregates while in the remaining 5 mortars reference values were used. In both series a group of mixtures incorporating RFA without correction of water and superplasticizer and a group with corrections needed to achieve the criterion of self-compactability was produced. In general, increasing the incorporation of RFA in mortars changes the amount of mixing water, increments the value of the yield stress, the viscosity and increases the thixotropy area. However, these changes are different in the binary or ternary mixtures. The aims of the study, which sought to evaluate the rheological behavior of the mortar phase of SCC, have been achieved. We conclude that the RFA are viable as a BAC component, although influencing the rheological behavior. Meanwhile this study demonstrates the effects and consequently the guidelines to be observed in the dosing studies for the SCC.

Keywords

Self-Compacting Concrete, Fine recycled aggregates, Rheology, Thixotropy.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos da dissertação	1
1.3. Metodologia e Organização do trabalho	2
Capítulo 2 - Estado da arte	5
2.1. Introdução	5
2.2. Reologia - Aspetos essenciais	5
2.2.1. Escoamento	6
2.2.2. Deformação	7
2.2.3. Viscosidade	9
2.2.4. Classificação dos fluidos	9
2.2.4.1. Fluidos Newtonianos	9
2.2.4.2. Fluidos Não-Newtonianos	10
2.3. Modelos reológicos	12
2.3.1. Modelo de Newton	14
2.3.2. Modelo de Ostwald-de-Waele	14
2.3.3. Modelo de Bingham	15
2.3.4. Modelo de Herschel-Bulkley	16
2.4. Betão auto-compactável	17
2.4.1. Propriedades do BAC no estado fresco	19
2.4.1.1. Trabalhabilidade	19
2.4.1.2. Comportamento reológico do BAC	21
2.4.2. Composição do BAC	24
2.4.3. Parâmetros condicionantes do comportamento reológico de pastas, argamassas e betões	27
2.4.3.1. Efeito da concentração e do tipo de partícula	28
2.4.3.2. Efeito das características do cimento	30
2.4.3.3. Efeito do superplastificante	31
2.4.3.4. Efeito da razão a/c	32
2.4.3.5. Efeito dos agregados finos e grossos	34
2.4.3.6. Efeito combinado do tempo e da temperatura	36
2.5. Tixotropia	38
2.5.1. Comportamento tixotrópico típico	40
2.5.2. Como medir a tixotropia - Metodologias	43
2.6. Agregados finos reciclados	46

2.6.1. Regulamentação existente para utilização de AFR	47
2.6.2. Produção e tratamento dos AFR	48
2.6.3. Propriedades dos betões, com agregados finos reciclados (BAFR), no estado fresco	49
2.7. Técnicas de avaliação do comportamento reológico no estado fresco	49
2.7.1. Ensaio direto - reómetros e viscosímetros	50
2.7.1.1. Técnica de medição do perfil rampa	54
2.7.1.1.1. Vantagens e desvantagens do perfil rampa	55
2.7.1.2. Técnica de medição do perfil step	56
2.7.1.2.1. Vantagens e desvantagens do perfil step	56
2.8. Conclusões	57
Capítulo 3 - Programa experimental	61
3.1. Introdução	61
3.2. Descrição dos materiais utilizados	61
3.2.1. Materiais finos	61
3.2.1.1. Ligante	61
3.2.1.2. Adições	62
3.2.2. Adjuvante	63
3.2.3. Agregados	63
3.2.4. Água de amassadura	66
3.3. Tipos de misturas finas preparadas	66
3.3.1. Misturas binárias de materiais finos	67
3.3.2. Misturas ternárias de materiais finos	68
3.4. Caracterização da fração granulométrica dos agregados	69
3.5. Método de cálculo para obtenção de argamassas	71
3.5.1. Folha de cálculo Excel	71
3.5.1.1. Parâmetros de cálculo	74
3.6. Produção de argamassas	77
3.7. Ensaios realizados em argamassas no estado fresco	79
3.7.1. Ensaios empíricos	79
3.7.1.1. Ensaio de fluidez - escoamento no “Funil-V”	79
3.7.1.2. Ensaio de espalhamento do Cone	82
3.7.2. Ensaio direto	84
3.7.2.1. Reómetro - Viskomat NT	84
Capítulo 4 - Tratamento, apresentação e discussão de resultados	89
4.1. Introdução	89
4.2. Tratamento de dados estatísticos	89
4.2.1. Teste do valor extremo (Grubbs)	89

4.3. Apresentação de resultados	90
4.3.1. Caracterização dos materiais utilizados	90
4.3.1.1. Ligante	90
4.3.1.2. Adições	93
4.3.1.3. Agregados	95
4.3.1.4. Adjuvantes	99
4.3.2. Curvas de referência dos agregados finos	99
4.3.2.1. Argamassas de referência binárias e ternárias	99
4.3.2.2. Argamassas com incorporação de agregados reciclados	101
4.3.3. Estudo das argamassas	104
4.3.3.1. Introdução	104
4.3.3.2. Argamassas de associação binária (Série 1)	105
4.3.3.3. Argamassas de associação ternária (Série 2)	116
4.3.3.4. Análise comparativa entre as argamassas corrigidas binárias e ternárias	123
4.3.3.5. Tensão de cedência das argamassas originais (Séries 1 e 2)	128
4.3.3.6. Análise comparativa entre as argamassas corrigidas e originais	130
4.3.3.7. Correlação dos parâmetros reológicos das argamassas com o escoamento	132
4.3.3.7.1. Tensão de cedência versus Diâmetro de espalhamento	132
4.3.3.7.2. Viscosidade versus Tempo de escoamento	134
4.3.3.8. Conclusões do estudo reológico das argamassas	135
Capítulo 5 - Conclusões gerais	137
5.1. Conclusões gerais	137
Bibliografia	141
Anexos	149
Anexo A - Estudo da Composição de Argamassas	151
Anexo A.1 - Composição de Argamassas - Série 1 Corrigida	153
Anexo A.2 - Composição de Argamassas - Série 2 Corrigida	161
Anexo B - Estudos Reológicos das Argamassas	169
Anexo B.1 - Reologia das Argamassas - Série 1 Corrigida	171
Anexo B.2 - Reologia das Argamassas - Série 1 Original	181
Anexo B.3 - Reologia das Argamassas - Série 2 Corrigida	191
Anexo B.4 - Reologia das Argamassas - Série 2 Original	201
Anexo C - Estudo Reológico Adicional das Argamassas	211
Anexo C.1 - Tixotropia das Argamassas - Série 1 Corrigida	213
Anexo C.2 - Tixotropia das Argamassas - Série 2 Corrigida	219

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Ação das partículas em diferentes tipos de escoamento	7
Figura 2.2 - Modelo das placas paralelas	8
Figura 2.3 - Gráfico Tensão de corte - Velocidade de corte para um líquido Newtoniano	10
Figura 2.4 - Curvas de escoamento para série de óleos de silicone, observando-se entrada no estado Não-Newtoniano, a uma tensão de corte de 2000 Pa	11
Figura 2.5 - Diferentes tipos de curvas de escoamento	12
Figura 2.6 - Reogramas de diversos comportamentos reológicos	13
Figura 2.7 - Modelos de Bingham e de Newton	15
Figura 2.8 - Modelo de Herschel-Bulkley	16
Figura 2.9 - Aproximação geral para obtenção do betão auto-compactável	20
Figura 2.10 - Efeito de arco (formação de “ponte” em abertura estreita)	21
Figura 2.11 - Características do betão fresco em função da tensão de cedência e viscosidade plástica	23
Figura 2.12 - Constituintes do betão. Microargamassa como fase líquida do betão	28
Figura 2.13 - Efeito da forma das partículas e concentração na viscosidade de suspensões de partículas a uma taxa de deformação de 300 s^{-1} (■) esfera; (□) grão; (•) prato; (o) haste	29
Figura 2.14 - Tensão de cedência versus dosagem de superplastificante	32
Figura 2.15 - Viscosidade plástica versus dosagem de superplastificante	32
Figura 2.16 - Efeito da razão a/c na tensão de cedência de diferentes argamassas	33
Figura 2.17 - Efeito da razão a/c na viscosidade plástica de diferentes argamassas	33
Figura 2.18 - Influência de diferentes tipos de agregados finos no comportamento reológico de argamassas	34
Figura 2.19 - Tensão de cedência versus volume de pasta	35
Figura 2.20 - Viscosidade plástica versus volume de pasta	35
Figura 2.21 - Variação da tensão de cedência em argamassas M1 produzidas com adjuvante PNS HRWRA de acordo com o tempo registado e temperaturas entre 10 e 27 °C	36
Figura 2.22 - Variação da viscosidade plástica em betões B1 e B2 de acordo com o tempo registado e temperaturas entre 20 e 30 °C	37
Figura 2.23 - Curva de escoamento para pasta de cimento demonstrando histerese tixotrópica quando velocidade de corte é aumentada e posteriormente reduzida ...	39
Figura 2.24 - Modelo para o comportamento tixotrópico	40
Figura 2.25 - Aumento faseado da velocidade de corte com resposta do material em forma de tensão de corte reduzida quando a velocidade de corte é constante	41
Figura 2.26 - Reorganização estrutural dependendo do tempo de repouso	41

Figura 2.27 - Reorganização estrutural quando a velocidade de corte é reduzida ...	42
Figura 2.28 - “Loops” de histerese quando o material é sujeito ao corte cíclico	43
Figura 2.29 - Deformação estrutural a uma constante taxa de deformação	44
Figura 2.30 - Princípio do teste “Loop”	45
Figura 2.31 - Princípio da medição dinâmica (oscilatória)	46
Figura 2.32 - Protótipo do reómetro ICAR e respetivas pás	51
Figura 2.33 - Dimensões dos elementos do reómetro ICAR	51
Figura 2.34 - Reómetro BTRHEOM	52
Figura 2.35 - Reómetro BML	52
Figura 2.36 - Reómetro Viskomat NT	52
Figura 2.37 - Curvas de escoamento para diferentes tipos de materiais	53
Figura 2.38 - Curvas de viscosidade para diferentes tipos de materiais	54
Figura 2.39 - Imagem gráfica de dados tipo introduzidos num perfil rampa	54
Figura 2.40 - Imagem gráfica de dados tipo introduzidos num perfil step	56
Figura 3.1 - Imagem da zona de carga da fábrica da OMYA COMITAL em Soure	62
Figura 3.2 - Tipos de areias utilizadas. Da esquerda para a direita: Areia reciclada, Areia natural 0/4 e Areia natural 0/2	65
Figura 3.3 - Curva de referência dos agregados finos, baseada na Tabela 3.3	70
Figura 3.4 - Imagem do equipamento de peneiração mecânica utilizado	71
Figura 3.5 - Processo de amassadura aplicado	78
Figura 3.6 - Misturadora utilizada na preparação das argamassas	78
Figura 3.7 - Dimensão do “Funil-V” utilizado no ensaio de fluidez para argamassas	80
Figura 3.8 - Enchimento do “Funil-V” com argamassa	80
Figura 3.9 - Escoamento da argamassa no “Funil-V”	81
Figura 3.10 - Dimensão do cone utilizado no ensaio de espalhamento para argamassas	82
Figura 3.11 - Fase 1: Enchimento do cone com argamassa	83
Figura 3.12 - Fase 2: Levantamento do cone e espalhamento da argamassa	83
Figura 3.13 - Fase 3: Medição do diâmetro máximo de espalhamento	84
Figura 3.14 - Unidades constituintes do reómetro Viskomat NT utilizado	85
Figura 3.15 - Menu principal para operação do Viskomat NT	86
Figura 3.16 - Perfil de ensaio utilizado (Step)	86
Figura 3.17 - Imagem de introdução do perfil no programa	87
Figura 3.18 - Início da medição. Introdução do nome e comentários do ficheiro	88
Figura 3.19 - Exportação de dados obtidos para o Excel	88
Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados	98
Figura 4.2 - Curvas granulométricas das misturas de agregados finos (Real e de Referência)	100

Figura 4.3 - Substituição de Areia natural 0/4 por 10% de Areia reciclada	102
Figura 4.4 - Substituição de Areia natural 0/4 por 30% de Areia reciclada	103
Figura 4.5 - Substituição de Areia natural 0/4 por 50% de Areia reciclada	104
Figura 4.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FC.0,80	106
Figura 4.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FC.0,80	107
Figura 4.8 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra1.FC.0,80	108
Figura 4.9 - Dosagem de água por metro cúbico das argamassas corrigidas da Série 1	111
Figura 4.10 - Dosagem de superplastificante por metro cúbico das argamassas corrigidas da Série 1	112
Figura 4.11 - Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 1	113
Figura 4.12 - Viscosidade versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 1	114
Figura 4.13 - Diâmetro de espalhamento versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 1	115
Figura 4.14 - Áreas de tixotropia versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 1	116
Figura 4.15 - Dosagem de água por metro cúbico das argamassas corrigidas da Série 2	119
Figura 4.16 - Dosagem de superplastificante por metro cúbico das argamassas corrigidas da Série 2	120
Figura 4.17 - Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 2	120
Figura 4.18 - Viscosidade versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 2	121
Figura 4.19 - Diâmetro de espalhamento versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 2	122
Figura 4.20 - Áreas de tixotropia versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 2	123
Figura 4.21 - Comparação da dosagem de água por metro cúbico entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2	124
Figura 4.22 - Comparação da dosagem de superplastificante por metro cúbico entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2	125
Figura 4.23 - Comparação da tensão de cedência com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2	126
Figura 4.24 - Comparação da viscosidade com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2	127
Figura 4.25 - Comparação do diâmetro de espalhamento com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2	128

Figura 4.26 - Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas originais da Série 1	129
Figura 4.27 - Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas originais da Série 2	130
Figura 4.28 - Comparação da tensão de cedência com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas e originais da Série 1	131
Figura 4.29 - Comparação da tensão de cedência com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas e originais da Série 2	132
Figura 4.30 - Correlação entre a tensão de cedência e o diâmetro de espalhamento das argamassas da Série 1	133
Figura 4.31 - Correlação entre a tensão de cedência e o diâmetro de espalhamento das argamassas da Série 2	133
Figura 4.32 - Correlação entre a viscosidade e o tempo de escoamento das argamassas da Série 1	134
Figura 4.33 - Correlação entre a viscosidade e o tempo de escoamento das argamassas da Série 2	135
 Anexos	
Figura B.1.1 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FC.0,80	174
Figura B.1.2 - Curva de escoamento da argamassa Amostra2.FC.0,80	174
Figura B.1.3 - Curva de escoamento da argamassa Amostra3.FC.0,80	175
Figura B.1.4 - Curva de escoamento da argamassa Amostra4.FC.0,80	175
Figura B.1.5 - Curva de escoamento da argamassa Amostra5.FC.0,80	176
Figura B.1.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra6.FC.0,80	176
Figura B.1.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FC.0,80 de referência	177
Figura B.1.8 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra2.FC.0,80 e de referência	177
Figura B.1.9 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra3.FC.0,80 e de referência	178
Figura B.1.10 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra4.FC.0,80 e de referência	178
Figura B.1.11 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra5.FC.0,80 e de referência	179
Figura B.1.12 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra6.FC.0,80 e de referência	179
Figura B.2.1 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FC.0,80	184
Figura B.2.2 - Curva de escoamento da argamassa Amostra2.FC.0,80.WSpRef	184
Figura B.2.3 - Curva de escoamento da argamassa Amostra3.FC.0,80.WSpRef	185
Figura B.2.4 - Curva de escoamento da argamassa Amostra4.FC.0,80.WSpRef	185
Figura B.2.5 - Curva de escoamento da argamassa Amostra5.FC.0,80.WSpRef	186

Figura B.2.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra6.FC.0,80.WSpRef	186
Figura B.2.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FC.0,80 de referência	187
Figura B.2.8 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra2.FC.0,80.WSpRef e de referência	187
Figura B.2.9 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra3.FC.0,80.WSpRef e de referência	188
Figura B.2.10 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra4.FC.0,80.WSpRef e de referência	188
Figura B.2.11 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra5.FC.0,80.WSpRef e de referência	189
Figura B.2.12 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra6.FC.0,80.WSpRef e de referência	189
Figura B.3.1 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FCCV.0,80	194
Figura B.3.2 - Curva de escoamento da argamassa Amostra2.FCCV.0,80	194
Figura B.3.3 - Curva de escoamento da argamassa Amostra3.FCCV.0,80	195
Figura B.3.4 - Curva de escoamento da argamassa Amostra4.FCCV.0,80	195
Figura B.3.5 - Curva de escoamento da argamassa Amostra5.FCCV.0,80	196
Figura B.3.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra6.FCCV.0,80	196
Figura B.3.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FCCV.0,80 de referência	197
Figura B.3.8 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra2.FCCV.0,80 e de referência	197
Figura B.3.9 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra3.FCCV.0,80 e de referência	198
Figura B.3.10 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra4.FCCV.0,80 e de referência	198
Figura B.3.11 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra5.FCCV.0,80 e de referência	199
Figura B.3.12 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra6.FCCV.0,80 e de referência	199
Figura B.4.1 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FCCV.0,80	204
Figura B.4.2 - Curva de escoamento da argamassa Amostra2.FCCV.0,80.WSpRef ...	204
Figura B.4.3 - Curva de escoamento da argamassa Amostra3.FCCV.0,80.WSpRef ...	205
Figura B.4.4 - Curva de escoamento da argamassa Amostra4.FCCV.0,80.WSpRef ...	205
Figura B.4.5 - Curva de escoamento da argamassa Amostra5.FCCV.0,80.WSpRef ...	206
Figura B.4.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra6.FCCV.0,80.WSpRef ...	206
Figura B.4.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FCCV.0,80 de referência	207
Figura B.4.8 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra2.FCCV.0,80.WSpRef e de referência	207

Figura B.4.9 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra3.FCCV.0,80.WSpRef e de referência	208
Figura B.4.10 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra4.FCCV.0,80.WSpRef e de referência	208
Figura B.4.11 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra5.FCCV.0,80.WSpRef e de referência	209
Figura B.4.12 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra6.FCCV.0,80.WSpRef e de referência	209
Figura C.1.1 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra1.FC.0,80	215
Figura C.1.2 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra2.FC.0,80	216
Figura C.1.3 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra3.FC.0,80	216
Figura C.1.4 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra4.FC.0,80	217
Figura C.1.5 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra5.FC.0,80	217
Figura C.1.6 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra6.FC.0,80	218
Figura C.2.1 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra1.FCCV.0,80	221
Figura C.2.2 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra2.FCCV.0,80	222
Figura C.2.3 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra3.FCCV.0,80	222
Figura C.2.4 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra4.FCCV.0,80	223
Figura C.2.5 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra5.FCCV.0,80	223
Figura C.2.6 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra6.FCCV.0,80	224

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Relações entre a tensão de corte e o gradiente de velocidade	13
Tabela 2.2 - Betão corrente vibrado versus Betão auto-compactável	24
Tabela 2.3 - Composição do BAC e suas principais características	24
Tabela 2.4 - Resumo dos efeitos nos parâmetros reológicos de argamassas, provocados por determinado tipo de alteração nas misturas	37
Tabela 2.5 - Lista geral das especificações nacionais acerca do uso de AFR em betões	47
Tabela 3.1 - Associações binárias de argamassa de materiais finos (Série 1)	68
Tabela 3.2 - Associações ternárias de argamassa de materiais finos (Série 2)	69
Tabela 3.3 - Curva de referência dos agregados finos proposta por Nepomuceno ...	70
Tabela 3.4 - Folha de cálculo EXCEL para argamassas, adaptada, proposta por Nepomuceno	73
Tabela 3.5 - Correções de amassadura em função do teor em água superficial dos agregados finos	74
Tabela 4.1 - Massa volúmica do ligante CEM I 42,5R	91
Tabela 4.2 - Ensaio mecânicos do ligante CEM I 42,5R	91
Tabela 4.3 - Análise química do ligante CEM I 42,5R	92
Tabela 4.4 - Ensaio físicos do ligante CEM I 42,5R	92
Tabela 4.5 - Massa volúmica das adições	93
Tabela 4.6 - Características químicas do fíler calcário	93
Tabela 4.7 - Características químicas das cinzas volantes	94
Tabela 4.8 - Características físicas do fíler calcário	94
Tabela 4.9 - Características físicas das cinzas volantes	95
Tabela 4.10 - Massa volúmica dos agregados finos	95
Tabela 4.11 - Absorção de água dos agregados	96
Tabela 4.12 - Análise granulométrica da Areia 0/2	96
Tabela 4.13 - Análise granulométrica da Areia 0/4	97
Tabela 4.14 - Análise granulométrica da Areia reciclada	97
Tabela 4.15 - Resumo dos resultados da análise granulométrica dos agregados finos	98
Tabela 4.16 - Características do superplastificante	99
Tabela 4.17 - Mistura da curva Real e de Referência dos agregados finos naturais ...	100
Tabela 4.18 - Substituição de Areia natural 0/4 por 10% de Areia reciclada	102
Tabela 4.19 - Substituição de Areia natural 0/4 por 30% de Areia reciclada	103

Tabela 4.20 - Substituição de Areia natural 0/4 por 50% de Areia reciclada	104
Tabela 4.21 - Parâmetros reológicos da argamassa Amostra1.FC.0,80	106
Tabela 4.22 - Valor máximo medido da viscosidade da argamassa Amostra1.FC.0,80	107
Tabela 4.23 - Quantificação da tixotropia da argamassa Amostra1.FC.0,80	108
Tabela 4.24 - Sumário dos resultados obtidos nas argamassas da Série 1	110
Tabela 4.25 - Sumário dos resultados obtidos nas argamassas da Série 2	118
 Anexos	
Tabela A.1.1 - Composição da argamassa Amostra1.FC.0,80	155
Tabela A.1.2 - Composição da argamassa Amostra2.FC.0,80	156
Tabela A.1.3 - Composição da argamassa Amostra3.FC.0,80	157
Tabela A.1.4 - Composição da argamassa Amostra4.FC.0,80	158
Tabela A.1.5 - Composição da argamassa Amostra5.FC.0,80	159
Tabela A.1.6 - Composição da argamassa Amostra6.FC.0,80	160
Tabela A.2.1 - Composição da argamassa Amostra1.FCCV.0,80	163
Tabela A.2.2 - Composição da argamassa Amostra2.FCCV.0,80	164
Tabela A.2.3 - Composição da argamassa Amostra3.FCCV.0,80	165
Tabela A.2.4 - Composição da argamassa Amostra4.FCCV.0,80	166
Tabela A.2.5 - Composição da argamassa Amostra5.FCCV.0,80	167
Tabela A.2.6 - Composição da argamassa Amostra6.FCCV.0,80	168
Tabela B.1.1 - Leituras dos ensaios empíricos das argamassas corrigidas da Série 1	173
Tabela B.1.2 - Parâmetros reológicos das argamassas corrigidas da Série 1	173
Tabela B.1.3 - Valores máximos medidos da viscosidade das argamassas corrigidas da Série 1	173
Tabela B.2.1 - Leituras dos ensaios empíricos das argamassas originais da Série 1 ...	183
Tabela B.2.2 - Parâmetros reológicos das argamassas originais da Série 1	183
Tabela B.2.3 - Valores máximos medidos da viscosidade das argamassas originais da Série 1	183
Tabela B.3.1 - Leituras dos ensaios empíricos das argamassas corrigidas da Série 2	193
Tabela B.3.2 - Parâmetros reológicos das argamassas corrigidas da Série 2	193
Tabela B.3.3 - Valores máximos medidos da viscosidade das argamassas corrigidas da Série 2	193
Tabela B.4.1 - Leituras dos ensaios empíricos das argamassas originais da Série 2 ...	203
Tabela B.4.2 - Parâmetros reológicos das argamassas originais da Série 2	203
Tabela B.4.3 - Valores máximos medidos da viscosidade das argamassas originais da Série 2	203
Tabela C.1.1 - Quantificação da tixotropia das argamassas corrigidas da Série 1 ...	215
Tabela C.2.1 - Quantificação da tixotropia das argamassas corrigidas da Série 2 ...	221

Lista de Acrónimos

AFN	Agregados Finos Naturais
AFR	Agregados Finos Reciclados
AFRB	Agregados Finos Reciclados de Betão
AGN	Agregados Grossos Naturais
AGR	Agregados Grossos Reciclados
BAC	Betão Auto-Compactável
BAFR	Betões com Agregados Finos Reciclados
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HRWRA	High Range Water Reducing Admixtures
ICAR	International Center for Aggregates Research
IST	Instituto Superior Técnico
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris (France)
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
PNS	Poli(naftalenossulfonatos)
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

γ	Deformação
δ	Ângulo de fase
η	Viscosidade ou viscosidade plástica
η_s	Viscosidade do meio de suspensão
\emptyset	Fração volumétrica das partículas
\emptyset_m	Fração volumétrica máxima das partículas
τ	Tensão de corte
τ_0	Tensão de cedência
A	Área do plano paralelo à força
a1	Percentagem unitária em volume absoluto da Areia 0/2
a2	Percentagem unitária em volume absoluto da Areia 0/4
a3	Percentagem unitária em volume absoluto da Areia reciclada
Al_2O_3	Óxido de alumínio
a/c	Razão em massa entre as quantidades de água e de cimento da mistura
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico ou celite
C_3S	Silicato tricálcico
d	Fator representativo da reatividade relativa do C_3A e do C_3S
D_m	Diâmetro médio de espalhamento, em mm
D_0	Diâmetro inicial na base do cone, em mm
F	Força aplicada de corte
fcv	Percentagem unitária em volume absoluto das cinzas volantes
fc1	Percentagem unitária em volume absoluto do cimento tipo I 42,5R
ffc	Percentagem unitária em volume absoluto do fíler calcário
g	Aceleração da gravidade
G_m	Área de espalhamento relativa
G'	Módulo de armazenamento
G''	Módulo de perda
K	Índice de consistência
M	Densidade, em kg/m^3
n	Fator indicativo do grau de comportamento Não-Newtoniano
R_m	Velocidade relativa de escoamento da argamassa, em s^{-1}
s	Desvio padrão amostral
SiO_2	Sílica
Sl	Diâmetro médio de espalhamento, em mm
Sp/P%	Razão percentual em massa entre as dosagens de superplastificante e de materiais finos na mistura
t	Tempo de escoamento da argamassa, em segundos
T_{50}	Tempo que o betão demora a atingir um diâmetro de 500 mm no ensaio de espalhamento, em segundos
Va	Volume da câmara da amostra do Picnómetro de Hélio
V_{C1}	Volume absoluto de cimento tipo I 42,5R, em m^3/m^3
V_{CV}	Volume absoluto de cinzas volantes, em m^3/m^3
Ve	Volume da câmara de expansão do Picnómetro de Hélio
V_{FC}	Volume absoluto de fíler calcário, em m^3/m^3

V_p	Volume absoluto de material fino da mistura, em m^3/m^3
V_p/V_s	Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de materiais finos e de agregados finos na mistura
V_s	Volume absoluto de agregados finos da mistura, em m^3/m^3
V_s	Volume do sólido
V_{s1}	Volume absoluto do agregado fino 1 (Areia 0/2), em m^3/m^3
V_{s2}	Volume absoluto do agregado fino 2 (Areia 0/4), em m^3/m^3
V_{s3}	Volume absoluto do agregado fino 3 (Areia reciclada), em m^3/m^3
V_{sp}	Volume de superplastificante da mistura, em m^3/m^3
V_{sp}/V_p	Razão em volume absoluto entre as quantidades de superplastificante e de materiais finos na mistura
V_v	Volume de vazios da mistura, em m^3/m^3
V_w	Volume de água da mistura, em m^3/m^3
V_w/V_p	Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de água e de materiais finos na mistura
x_i	Valor da amostra
Z	Valor de distribuição normal
Z_c	Valor crítico baseado na distribuição de Z
$\dot{\gamma}$	Velocidade de corte ou taxa de deformação
\bar{x}	Média amostral
$[\eta]$	Viscosidade intrínseca
{ }	Quantidade relativa de C_3A e de C_3S , em percentagem

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Considerações iniciais

O Homem como ser racional sempre procurou o aperfeiçoamento de técnicas e materiais que pudessem facilitar a sua vida, através das suas incríveis invenções. No setor da construção isso não foi exceção e estão permanentemente a surgir novas formas de construção, e novos materiais com diversas possibilidades de aplicação. Com o avanço da ciência, novos patamares que outrora se julgavam inalcançáveis tornaram-se reais nos nossos dias.

Atualmente, a produção de betões, mais precisamente dos betões auto-compactáveis (BAC), envolve a utilização de diversos tipos de materiais (material compósito) como agregados finos ou grossos, materiais finos como adições e ligantes, adjuvantes e água de amassadura. Todavia, estão constantemente a ser integrados diferentes materiais na composição dos betões, ora devido à falta de alguns recursos usualmente utilizados, ora numa tentativa de melhorar o desempenho do produto final. Um dos recursos que têm sido implementado como “novo ingrediente sustentável”, e que aqui se aborda, é o agregado fino reciclado.

As diferentes relações entre as quantidades desses materiais, nas misturas a produzir, influenciam determinantemente a respetiva qualidade e o desempenho que o produto final apresenta. Devido à relativa sensibilidade à dosagem, pequenas variações na quantidade de materiais constituintes das misturas, podem levar à redução das possibilidades de otimização das mesmas e também a comportamentos inesperados das argamassas. Assim, como meio auxiliar de aperfeiçoamento das características finais dos betões, recorre-se a um ramo da ciência denominado Reologia.

No ano de 2011 foi efetuado um estudo por PINTO (2011), o qual pretendeu avaliar as propriedades do BAC com inclusão de agregados finos reciclados. Assim, e no seu seguimento, houve a intenção de avaliar reologicamente esse mesmo tipo de argamassas representativas do BAC, como forma de complemento ao seu estudo.

1.2. Objetivos da dissertação

A presente dissertação tem como objetivo principal a realização de um estudo reológico em betões auto-compactáveis com incorporação de agregados finos reciclados, mais

precisamente o estudo do seu comportamento reológico no estado fresco. Tendo em vista que mais da metade do volume do BAC é ocupado pela sua argamassa, este estudo é realizado em argamassas constituintes do BAC, sendo estas compostas de dois tipos de misturas: Misturas Binárias e Misturas Ternárias. Nas diferentes misturas parte dos agregados finos naturais, mais precisamente a areia 0/4 existente foi sendo continuamente substituída em percentuais de 10%, desde os 10% até 50% da totalidade da respetiva areia existente, por uma areia reciclada. Logo, existem dois traços de referência distintos, a que corresponde um à Mistura Binária, e possuindo este como materiais finos o Cimento e o Filer Calcário, e outro ao traço da Mistura Ternária, observando-se na sua composição de finos, Cimento, Filer Calcário e Cinza Volante.

Para a produção das argamassas recorreu-se ao Método desenvolvido por NEPOMUCENO *et al.* (2010), método que tem como principal objetivo o doseamento acertado das diferentes quantidades de materiais integrantes do betão, para garantia de compatibilidade dos mesmos.

Deste modo, o presente trabalho de investigação busca dar resposta a algumas questões:

- A influência da inclusão de diferentes percentagens de agregados finos reciclados por permuta do agregado fino natural das misturas;
- As diferenças reológicas existentes entre uma mistura binária e uma mistura ternária (mistura com Cinza Volante);
- A influência dos agregados finos reciclados na tixotropia das misturas.

Há que salientar que os betões auto-compactáveis são materiais compósitos sensíveis em termos de doseamento dos seus constituintes, o que por sua vez, torna o estudo do seu comportamento reológico de grande importância. Um doseamento adequado, utilizando os materiais certos, é o fator chave num correto comportamento do betão em todos os seus estados, desde a fase de fabricação, passando pela cura, até ao seu endurecimento.

1.3. Metodologia e Organização do trabalho

Para a redação da presente dissertação, baseada num respetivo trabalho de investigação, houve a necessidade de elaborar um plano e seguir uma metodologia, a qual teve como fase primária uma recolha de informação através de pesquisa bibliográfica de fontes nacionais e internacionais. A aquisição de conhecimento e de “instrumentos” nesta fase inicial permitiu a

posterior realização do trabalho experimental e uma maior sensibilidade para a elaboração da respetiva análise aos resultados dos ensaios.

A dissertação é constituída por 5 capítulos, os quais se encontram organizados da forma seguidamente descrita.

Neste primeiro capítulo são apresentadas as razões pela qual se optou por realizar este trabalho de investigação, assim como os seus objetivos e onde é descrita a estrutura de todo o documento.

Do segundo capítulo consta o levantamento do estado da arte, das fontes analisadas, tanto nacionais como estrangeiras, e consideradas importantes no âmbito da investigação.

No capítulo número 3 são apresentados todos os materiais utilizados na produção das misturas de argamassa envolvidas, sendo indicadas algumas características e meios de acondicionamento dos materiais. São também descritos todos os procedimentos adotados na realização dos ensaios, de agregados e de argamassas no estado fresco, os quais postos em prática de acordo com as especificações das normas regulamentadas. Além disto, é feita referência aos diferentes equipamentos e utensílios utilizados.

Relativamente ao capítulo número 4, este engloba a parte relacionada com os resultados, desde o tratamento, apresentação e debate, obtidos a partir do trabalho experimental, para argamassas, realizado em laboratório. Daqui constarão portanto todos os resultados dos ensaios descritos no capítulo anterior. Pretendeu-se analisar o desempenho do comportamento de argamassas com a inclusão crescente de agregados finos reciclados, verificando as alterações relativas a uma referência, e por isso, sempre que necessário, realizaram-se comparações de resultados com os de estudos realizados por outros autores, os quais se encontram disponíveis no conteúdo bibliográfico.

No último e quinto capítulo são apresentadas as conclusões principais do estudo, e possíveis contribuições do mesmo.

A dissertação termina com a exposição das referências bibliográficas e dos anexos aludidos ao longo da mesma.

Capítulo 2 - Estado da Arte

2.1. Introdução

A complexidade, de alguma dimensão, atribuída ao tema central desta dissertação, Reologia do Betão auto-compactável com agregados finos reciclados, e o fato do mesmo exigir um conhecimento alargado, acerca dos distintos fenómenos intrínsecos, associados à relação entre os diferentes materiais utilizados na produção deste tipo de betões, levou a uma abordagem aprofundada do assunto no corrente capítulo.

Sabendo de início que o tema da dissertação é relativamente limitado em termos de estudos, e de documentação em Portugal, houve a necessidade de atribuir especial destaque ao estudo. Este trabalho consistiu no estudo de diferentes argamassas, aonde na sua constituição presenciavam agregados finos reciclados, por forma a observar aspetos fundamentais da reologia de argamassas frescas de betão auto-compactável. Este passo foi ainda necessário para a realização, posterior, do trabalho experimental e da discussão dos resultados obtidos no mesmo.

Como ciência, a reologia encontra-se muito pouco divulgada e é desconhecida por grande parte dos engenheiros civis. Este é um fato que se deve à sua irrelevante discussão nas universidades, mais especificamente nos cursos de engenharia civil, onde não ocorre uma discussão aprofundada do capítulo que trata da reologia de suspensões de materiais não newtonianos. Uma maior divulgação e discussão do assunto nas universidades poderia ter um impacto positivo sobre o tema, auxiliando até na criação de uma base sólida documentada, e promovendo o desenvolvimento de novas argamassas e betões, com integração de novos materiais, para aplicação a curto prazo na construção.

2.2. Reologia - Aspetos essenciais

Foi no ano de 1920 do século XX que o vocábulo “reologia” foi introduzido por Eugene Bingham. Esta palavra reologia teve origem nos vocábulos gregos “rheos” (fluir), e “logos” (ciência ou estudo). Sendo assim, a palavra reologia pode definir-se como a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria, e lida com relações entre tensão, deformação e tempo (BANFILL e TATTERSALL, 1983; BARNES, 2000; VIEIRA, 2010).

A reologia é complexa e com algum grau de dificuldade de compreensão, no entanto não é um assunto em que sejamos totalmente principiantes pois lidamos diariamente com ela nas nossas vidas. A densidade dos líquidos que ingerimos, os combustíveis utilizados nos nossos veículos, e até a viscosidade do sangue que nos circula pelo corpo, são alguns dos aspectos relativos ao assunto e a que estamos ambientados. Como consumidor, importa ao ser humano não só ter a informação de que um produto é “novo e melhorado” mas também se o produto é “espesso ou cremoso”, isto porque tais propriedades reológicas são mais agradáveis aos sentidos, como a visão, gosto e tato. É, por isso, importante o ajustamento reológico dos produtos, na atividade de desenvolvimento de novos produtos, estando sempre esta orientada para satisfazer as necessidades de potenciais clientes (BARNES, 2000).

Usualmente recorremos a termos com conotação reológica, como por exemplo textura, viscosidade e consistência, porém estas palavras podem estar associadas tanto a uma ideia positiva como negativa. Por isso, enquanto um produto apelidado de “espesso e cremoso” pode implicar um dado positivo, já quando é designado por “pegajoso, coesivo” pode pressupor uma ideia totalmente oposta, negativa, no que diz respeito aos líquidos serem demasiado viscosos. Na mente do consumidor há a tendência de associar um produto mais viscoso a uma ideia de “concentração e força”, enquanto num produto de baixa viscosidade somos levados a para a ideia de “fragilidade” (BARNES, 2000).

2.2.1. Escoamento

O escoamento, de um líquido, pode ser explicado de uma forma simples. Temos o exemplo de um recipiente com água sendo transportado, e com certeza que essa água se move superficialmente. Porém essa água não se encontra em escoamento, apenas quando a derramamos do recipiente ela entra em escoamento. E porquê? A razão deve-se ao fato de no escoamento, os elementos do líquido se estarem a deformar, havendo pontos no líquido que se movem relativamente a outros pontos. São conhecidos dois tipos de escoamento: o escoamento de corte e o escoamento distensivo. É de notar que as diferenças que se verificam entre estes dois tipos de escoamento são relativamente pequenas e apenas variam nas direções tomadas pelas partículas do líquido. No escoamento de corte fica evidenciado o movimento das partículas líquidas, onde estas se cruzam entre elas ou passam umas sobre as outras, enquanto num escoamento distensivo as partículas afastam-se umas das outras ou deslocam-se em direção umas das outras (figura 2.1) (BARNES, 2000).

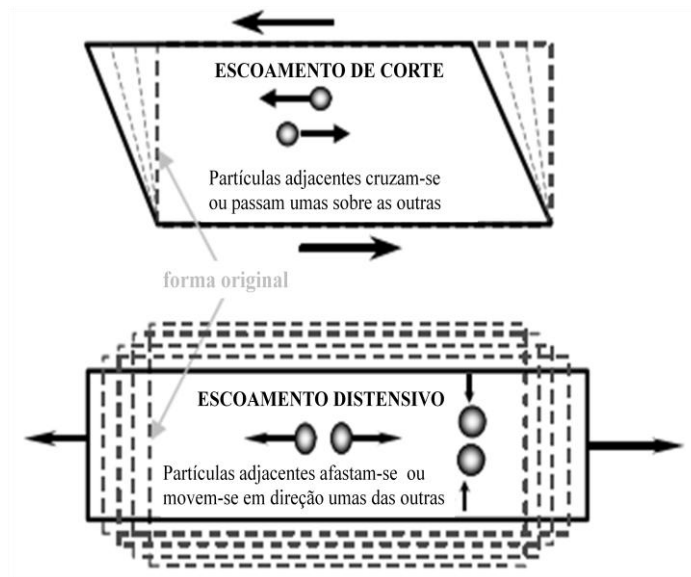


Figura 2.1 - Ação das partículas em diferentes tipos de escoamento [adaptada de BARNES, 2000].

Os diferentes líquidos são conhecidos por exibirem diferentes viscosidades, logo isso implica uma maior velocidade de escoamento de uns materiais relativamente a outros. Como exemplo, água sendo derramada de um balde flui muito mais rapidamente que um óleo sendo derramado dum recipiente semelhante. Pode dizer-se que os líquidos foram feitos para escoar, quando a estes lhes são ministradas velocidade. É de notar que, para uma dada “força”, a velocidade é reduzida quando a viscosidade aumenta, enquanto para uma dada “velocidade”, a força resultante aumenta aquando dum aumento da viscosidade (BARNES, 2000).

2.2.2. Deformação

De forma a descrever este conceito da deformação alude-se muitas vezes ao modelo das placas paralelas (figura 2.2). Neste modelo, os espaços entre placas são preenchidos com um líquido. Caso seja aplicada uma força na placa móvel superior, o que acontece é que é criada uma tensão de corte e o líquido sofre uma deformação. A tensão de corte define-se como a força aplicada na placa móvel superior dividida pela respetiva área A . A deformação por sua vez é expressa por dx/dy , ou pelo ângulo γ . O diferencial temporal é denominado de taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) (VIEIRA, 2010; WESTERHOLM, 2006).

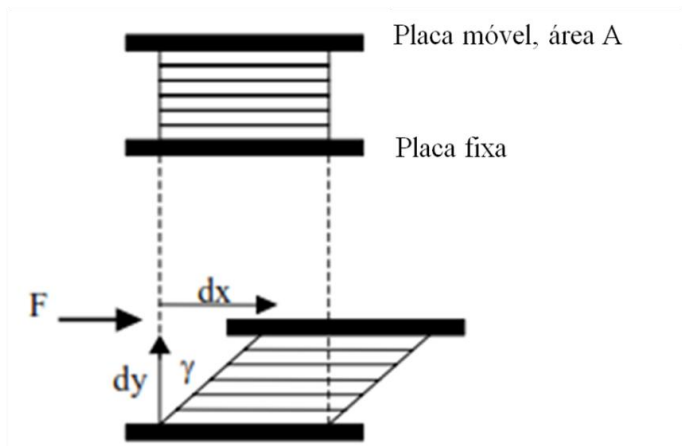


Figura 2.2 - Modelo das placas paralelas [adaptado de WESTERHOLM, 2006].

Existe uma variedade de gases e líquidos homogêneos, onde se pode verificar que a tensão de corte, τ , a qual é exercida entre dois planos paralelos do fluido, é proporcional à velocidade de deformação por corte, ou, de forma simplificada, velocidade de corte (ou gradiente de velocidade), $\dot{\gamma}$, verificado numa direção perpendicular à do escoamento (VIEIRA, 2010):

$$\bar{A} = \tau = \eta \left(\frac{dx}{dy} \right) \quad (2.1)$$

Ou:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Em que:

F - Força de corte aplicada;

A - Área do plano paralelo à força;

τ - Tensão de corte ($\tau = \frac{F}{A}$);

η - Coeficiente de viscosidade ou Viscosidade;

$\dot{\gamma}$ - Velocidade de corte ($\dot{\gamma} = \frac{dx}{dy}$).

De acordo com a equação (2.1), a qual designa a Lei de Newton para a viscosidade, se for aplicada uma força de corte F a um determinado líquido laminar, isso irá traduzir-se numa indução de um gradiente de velocidade no sistema.

2.2.3. Viscosidade

Muito antes de a viscosidade ser reconhecida como propriedade material quantificável, já havia um reconhecimento universal de que os líquidos pudessem ser viscosos. Mais tarde, os cientistas viriam a descobrir que qualitativamente a viscosidade era uma propriedade de um líquido, a qual era uma medida de resistência ao escoamento. Portanto, quanto mais elevada fosse a viscosidade de um líquido, menor seria a velocidade do respetivo escoamento.

Todo o tipo de fluxo é “contrariado”, ou regista “fricção interna” entre moléculas. Esta propriedade é conhecida por viscosidade (η). Esta traduz-se pela divisão da tensão de corte pela velocidade de corte (equação (2.3)), e tem como unidade SI o Pascal segundo (Pa.s) (BARNES, 2000; WESTERHOLM, 2006).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.3)$$

É de referir que a viscosidade dos materiais pode ser afetada significativamente por determinadas variáveis como a taxa de deformação, temperatura, pressão, estrutura molecular, peso molecular e ainda pelo tempo de corte. Por exemplo, a viscosidade de um gás aumenta com a temperatura, enquanto a viscosidade de um líquido diminui com a temperatura (IZMIR INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2008).

2.2.4. Classificação dos fluídos

Derivado das suas características, os fluídos podem ser classificados em dois tipos, Newtonianos ou Não-Newtonianos. Nos dois subtópicos seguintes é feita uma descrição acerca destes tipos de materiais.

2.2.4.1. Fluídos Newtonianos

Um fluido Newtoniano é aquele que exhibe o mais simples comportamento de escoamento, já que existe uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de deformação, ou seja, a viscosidade não varia com a taxa de deformação (figura 2.3). Para além disto, a viscosidade

também permanece constante relativamente ao tempo. A água e a glicerina são exemplos deste tipo de fluidos, no entanto possuem diferentes viscosidades (WESTERHOLM, 2006).

Isaac Newton (1642-1727) desenvolveu um estudo aonde observou o comportamento dos líquidos. Esse estudo resultou na publicação de “Philosophiae Naturalis corte”, onde referia que “A resistência que é atingida pela ausência de escorregamento entre partes do líquido, mantendo todo o resto constante, é proporcional à velocidade com a qual aquelas partes se separam umas das outras” (VIEIRA, 2010).

Em termos de comportamento reológico, sempre que um fluido satisfaça a equação (2.1) deve o mesmo ser designado por fluido Newtoniano, caracterizando-se apenas pelo parâmetro viscosidade. Neste tipo de fluidos, sempre que for aplicada uma tensão, haverá escoamento e pode observar-se uma velocidade nula para uma tensão igual a zero (VIEIRA, 2010).

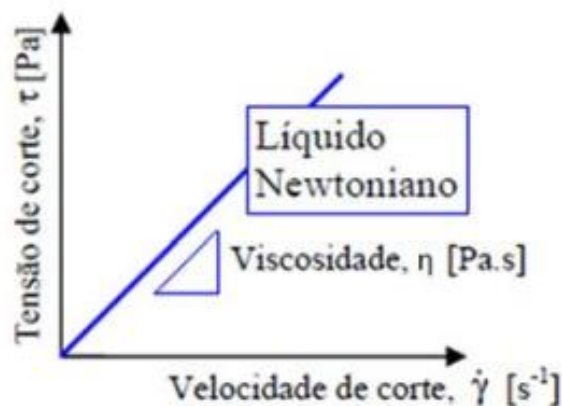


Figura 2.3 - Gráfico Tensão de corte - Velocidade de corte para um líquido Newtoniano [VIEIRA, 2008].

2.2.4.2. Fluidos Não-Newtonianos

No entanto, também existem materiais que exibem características Não-Newtonianas. Estes materiais apresentam uma viscosidade que varia com a taxa de deformação, ao contrário dos fluidos Newtonianos (VIEIRA, 2010).

Atingindo uma determinada e elevada velocidade de corte, todos os líquidos se tornam Não-Newtonianos. Como exemplo, a viscosidade de uma gama típica de óleos de silicone (utilizados como padrão Newtoniano) apresentada na figura 2.4, onde se tornam Não-Newtonianos a um cada vez menor valor da velocidade de corte, conjuntamente com o aumento da viscosidade (BARNES, 2000).

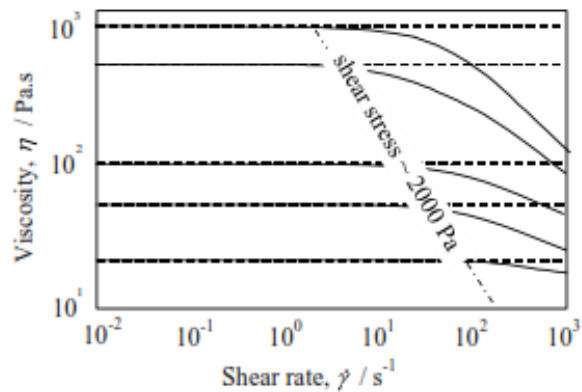


Figura 2.4 - Curvas de escoamento para série de óleos de silicone, observando-se entrada no estado Não-Newtoniano, a uma tensão de corte de 2000 Pa [BARNES, 2000].

O comportamento dos líquidos Não-Newtonianos é caracterizado através de materiais Reofluidificantes ou pseudoplásticos, Reo-espessantes ou dilatantes, e pelos materiais plásticos de Bingham (WESTERHOLM, 2006).

Descrevendo cada um dos materiais, os dilatantes apresentam no seu comportamento um aumento de viscosidade na ocorrência de um aumento da velocidade de corte, sendo este o comportamento verificado em suspensões muito concentradas.

Por sua vez, os materiais pseudoplásticos demonstram um decréscimo na viscosidade quando do aumento da velocidade de corte, significando isto que estes materiais fluem mais facilmente com um aumento da velocidade de corte. As soluções poliméricas são exemplos deste tipo de material.

Relativamente aos materiais plásticos Binghamianos, estes não escoam se não houver uma tensão de cedência que seja excedida, verificando-se no entanto uma relação linear entre a tensão de corte e a velocidade de corte, após o início do escoamento. Este é um tipo de material que se comporta como sólido antes do início do escoamento, e como um líquido viscoso após a tensão de cedência excedida (WESTERHOLM, 2006). Duma forma simples, a tensão de cedência pode ser descrita como a tensão necessária para dar início ao escoamento, enquanto a viscosidade plástica é a quantidade de resistência ao escoamento, logo que a tensão de cedência é excedida (AMZIANE *et al.*, 2006; NEPOMUCENO, 2005; WESTERHOLM, 2006).

Aludindo às propriedades reológicas das suspensões cimentícias, como o betão e argamassa, podem ser descritas através da equação (2.4), correspondente ao modelo de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (2.4)$$

Em que:

τ_0 - Tensão de cedência.

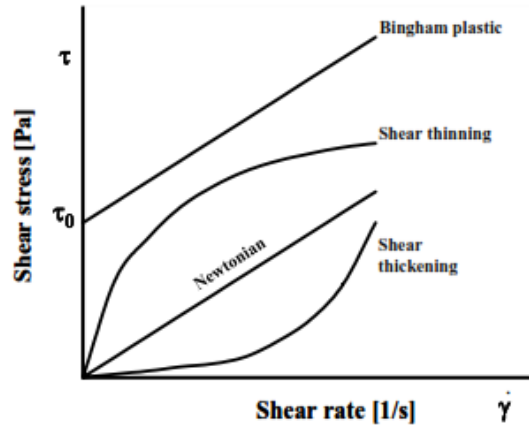


Figura 2.5 - Diferentes tipos de curvas de escoamento [WESTERHOLM, 2006].

2.3. Modelos reológicos

As curvas de escoamento (figura 2.5) e as curvas de viscosidade são normalmente utilizadas para descrever os comportamentos do escoamento, e obtém-se a partir de reômetros rotacionais. Estas são utilizadas para determinar as interdependências de velocidade de corte e de tensão de corte para um determinado material (AMZIANE *et al.*, 2006; KEALY, 2007a). Em termos de representação podem ser descritas em eixos logarítmicos e também lineares (KEALY, 2007a).

Os modelos reológicos podem descrever-se, basicamente, como sendo as curvas geradas partindo da informação introduzida nos viscosímetros ou reômetros, e são um auxílio na descrição das formas dos diferentes tipos de curvas de escoamento. São equações matemáticas com parâmetros ajustáveis, o que representa o mais aproximadamente possível os comportamentos experimentais que se observam (KEALY, 2007a).

Existem diversos modelos que podem ser aplicados em conformidade com os diferentes tipos de materiais a estudar. Na figura 2.6 podem observar-se alguns gráficos (também chamados de reogramas) que descrevem relações entre tensão de corte e velocidade de corte.

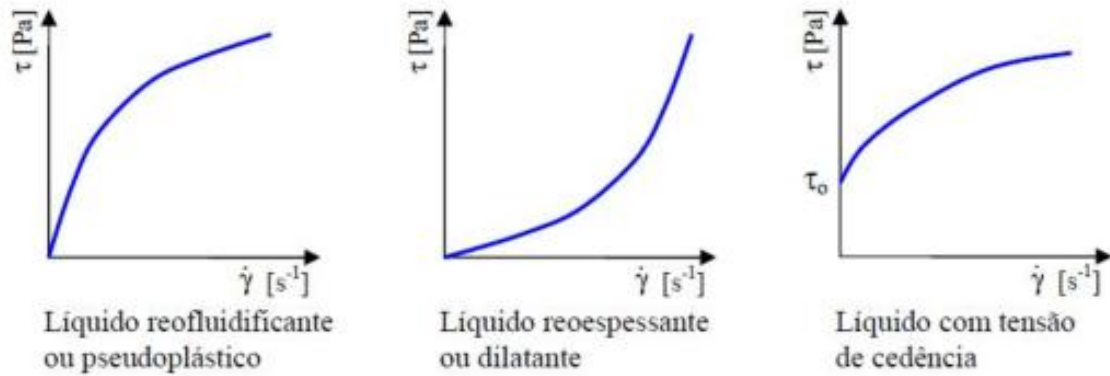


Figura 2.6 - Reogramas de diversos comportamentos reológicos [VIEIRA, 2008].

Na tabela 2.1 representam-se as expressões normalmente utilizadas na caracterização do comportamento reológico de fluidos e suspensões (FERRARIS, 1999). Destas expressões matemáticas serão descritas apenas as quatro consideradas mais recorrentes e de maior importância.

Tabela 2.1 - Relações entre a tensão de corte e o gradiente de velocidade [FERRARIS, 1999].

Autor	Expressão
Newton	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Herschel e Bulkley	$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$
Lei de potência	$\tau = A \dot{\gamma}^n$ n=1: fluido Newtoniano; n>1: fluido dilatante; n<1: fluido pseudo-plástico.
Vom Berg e Oswald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{C} \right)$
Eyring	$\tau = a \dot{\gamma} + B \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{C} \right)$
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni, Massida e Sanna	$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \delta$

- tensão de corte; η - viscosidade;
 τ_0 - tensão limite de escoamento; $\dot{\gamma}$ - gradiente de velocidade.
A, a, B, b, C, k, n, α , β , δ - constantes;

2.3.1. Modelo de Newton

O modelo Newtoniano (figura 2.7) foi um dos primeiros a ser utilizado, sendo um dos mais básicos. Este é caracterizado por uma relação linear entre a velocidade de corte e a tensão de corte (apresenta uma viscosidade constante). No seu gráfico pode observar-se que o eixo da tensão de corte é interceptado no seu valor de 0,0 Pa. O modelo é expresso matematicamente através da equação (2.5) (KEALY, 2007a):

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Onde:

η - Viscosidade ou viscosidade plástica, constante de proporcionalidade (inclinação da curva de escoamento).

2.3.2. Modelo de Ostwald-de-Waele

Este é um modelo que se aplica quando a viscosidade não é constante, mas mesmo assim o material tem uma intercepção no valor zero no eixo das tensões de corte. É um modelo que tem derivação de uma lei matemática chamada “lei da potência”, possuindo parâmetros (K; n) que não estão presentes em outros modelos (equação (2.6)). São parâmetros que ajudam a descrever os materiais pseudoplásticos e dilatantes (figura 2.8) (KEALY, 2007a).

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

Em que:

K - Índice de consistência;

n - Fator indicativo do grau de comportamento Não-Newtoniano.

Os materiais são identificados como fluídos dilatantes quando $n > 1$, pseudoplásticos quando $n < 1$, e Newtonianos quando $n = 1$ (KEALY, 2007a).

2.3.3. Modelo de Bingham

Na generalidade, nenhum dos sistemas diluídos, como lamas, pastas e suspensões, se considera Newtoniano (KEALY, 2007a). A mais comum relação constitutiva usada para caracterização do escoamento de betões é o modelo proposto por Bingham, o qual requer a determinação de uma tensão de cedência, τ_0 , e uma viscosidade plástica, η , como demonstrado na equação (2.7) (AMZIANE *et al.*, 2006; KEALY, 2007a). A tensão de cedência que se observa nas curvas de escoamento associadas a estes materiais traduz-se através da interseção, positiva, da curva com o eixo da tensão de corte.

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (2.7)$$

Onde:

$$\tau \geq \tau_0.$$

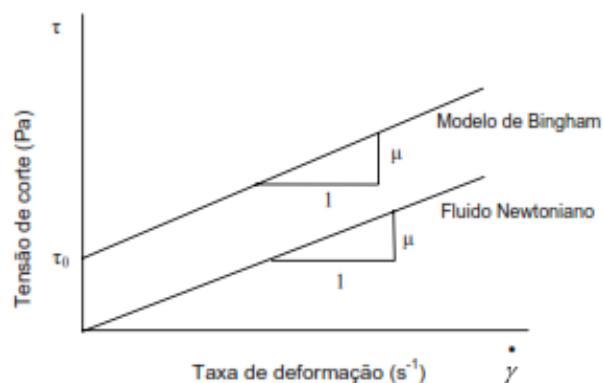


Figura 2.7 - Modelos de Bingham e de Newton [KHAYAT e TANGTERMSIRIKUL, 2000].

É de apontar que, apesar de este modelo ter a capacidade de superar a limitação do modelo de Newton (existência da tensão de cedência), mesmo assim não é suficiente para descrever características pseudoplásticas da generalidade dos fluidos não Newtonianos. Isto acontece porque quando a tensão de cedência é ultrapassada, a relação tensão de corte e velocidade de corte, é linear, como verificado na figura 2.7. Mesmo assim, muitas suspensões de partículas, como as cimentícias, apresentam comportamentos próximos do de Bingham a velocidades de corte baixas (FERRARIS, 1999; KEALY, 2007a; VIEIRA, 2008).

2.3.4. Modelo de Herschel-Bulkley

FERRARIS *et al.* (1998) descreveram a existência de tensões de cedência negativas aquando da aplicação de uma aproximação linear, como a de Bingham, no cálculo em betões auto-compactáveis, apesar destas não serem fisicamente possíveis. A aplicação de uma aproximação de Herschel-Bulkley evita essas tensões de cedência negativas, porém apresenta a desvantagem de possuir três parâmetros da curva, e apenas o parâmetro da tensão de cedência pode ser fisicamente interpretado.

Este modelo de Herschel-Bulkley é considerado como o mais completo em comparação aos restantes modelos descritos (LARRARD e SEDRAN, 1999). Isto, como já foi referido, deve-se ao fato da existência de três parâmetros, os quais estão representados na equação (2.8). O respetivo modelo é utilizado para o estudo de materiais viscoplásticos onde é exibida uma tensão de cedência, e se observam respostas pseudoplásticas ou dilatantes no escoamento, com uma crescente velocidade de corte. Encontra-se ilustrado na figura 2.8.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2.8)$$

Os parâmetros da equação (τ_0 , K e n) assumem o significado já referido anteriormente.

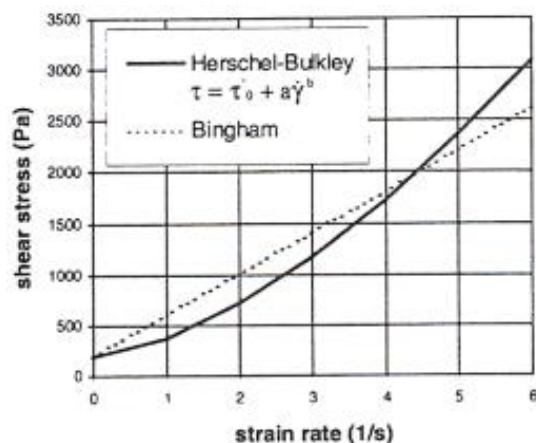


Figura 2.8 - Modelo de Herschel-Bulkley [LARRARD e SEDRAN, 1999].

Este método é apropriado para betões devido à utilização das constantes empíricas K e n que representam uma curva de escoamento não-linear (AMZIANE *et al.*, 2006).

Este modelo reduz-se à lei de Newton quando $\tau_0 = 0$ e $n = 1$, transforma-se no modelo de Bingham quando $n = 1$, e na lei da potência quando $\tau = 0$ (FERRARIS, 1999; VIEIRA, 2008).

Em termos de conclusão, importa referir que, quanto maior a quantidade de informação disponível, melhor o acerto e maior a precisão com que o modelo escolhido irá prever o comportamento do escoamento para um dado líquido.

Os modelos matemáticos são independentes do tipo de ensaio utilizado para gerar os dados, nem dependem das técnicas aplicadas para o efeito (KEALY, 2007a).

2.4. Betão auto-compactável

A necessidade da existência de um betão com maior homogeneidade associado a uma melhoria na durabilidade das estruturas, independentemente da qualidade dos trabalhos de compactação em obra, levou ao surgimento do betão auto-compactável. A necessidade deste novo tipo de betão foi proposta pelo professor Okamura em 1986 (OKAMURA e OUCHI, 1999), o qual realizou junto dos seus colaboradores os primeiros trabalhos de investigação conducentes ao desenvolvimento deste betão na Universidade de Tóquio. Em 1988 foi concluído o protótipo de “betão auto-compactável” usando materiais correntes (VIEIRA, 2008). O primeiro artigo sobre betões auto-compactáveis foi apresentado por Ozawa em 1989. Uma posterior apresentação em 1992, por Ozawa em Istambul (OKAMURA e OUCHI, 1999), acelerou a divulgação do conceito ao mundo. Com o passar dos anos a investigação sobre os betões auto-compactáveis generalizou-se a todo o mundo. Em 1996 Okamura através de uma palestra promoveu o interesse dos investigadores e engenheiros na América do Norte. A partir do Japão a tecnologia divulgou-se através da Ásia e chegou à Europa por volta de 1993. Em 1999 ocorreu em Estocolmo o primeiro simpósio internacional RILEM sobre o betão-auto-compactável. O segundo simpósio teve lugar em Tóquio dois anos depois. O terceiro simpósio internacional ocorreu em 2003 na Islândia e teve a contribuição de 26 países. No prefácio deste simpósio o betão auto-compactável foi considerado por muitos entendidos na matéria como sendo a maior evolução na tecnologia do betão nas últimas décadas devido à melhoria no desempenho e ambiente de trabalho (NEPOMUCENO, 2005).

Existem vários conceitos para definir o BAC, no entanto todos eles tem por base os mesmos princípios. LARRARD (1999) e FERRARIS e LARRARD (1998) consideram o betão auto-compactável como uma suspensão concentrada onde os sólidos estão dispersos numa fase aquosa fluida. NIELSEN (2001) e GEIKER *et al.* (2002) consideram o BAC como um sistema de duas fases que consiste numa argamassa onde os agregados grossos estão dispersos (fase de Bingham). Já a auto-compactabilidade do betão fresco é muitas vezes descrita como a

capacidade que este betão possui de fluir pelo seu próprio peso enquanto mantém a homogeneidade adequada sem segregação. Esta capacidade é conseguida assegurando as propriedades reológicas adequadas do betão fresco e uma adequada viscosidade plástica conjuntamente com uma tensão de cedência baixa (AZZOUZ, 2012; VIEIRA, 2008). A auto-compactibilidade do betão fresco também é descrita como a capacidade que este possui de preencher as cofragens e envolver os varões das armaduras apenas pela ação da gravidade e sem perda de homogeneidade. Para dotar o betão desta capacidade, ele deve possuir as propriedades reológicas e de trabalhabilidade adequadas, uma vez que, durante a betonagem, este tipo de betão não se encontra sujeito a qualquer energia externa resultante da vibração, apiloamento ou ações similares (NEPOMUCENO, 2005).

Em termos de classificação, os diferentes modos de obtenção de betões auto-compactáveis propostos até ao momento podem ser classificados em três tipos diferentes, consoante o método usado para prevenir a segregação, isto é, o método usado para aumentar a viscosidade plástica da pasta (NEPOMUCENO, 2005):

- Betões auto-compactáveis com grande quantidade de materiais finos (ou betão auto-compactável do tipo finos);
- Betões auto-compactáveis com agentes de viscosidade (ou betões auto-compactáveis do tipo agentes de viscosidade);
- Betões auto-compactáveis que combinam a elevada dosagem de materiais finos com a utilização de um agente de viscosidade (ou betões auto-compactáveis do tipo combinação).

Existem também algumas desvantagens associadas ao BAC. Uma das principais é o seu elevado custo comparativamente aos betões correntes vibrados. Esse custo resulta das elevadas percentagens de materiais finos que entram na sua composição tais como o cimento. Outra desvantagem do BAC está relacionada com as suas propriedades no estado endurecido, concretamente por este apresentar maior suscetibilidade a fenómenos de retração e fluência comparativamente aos betões corrente vibrados, desvantagem que também resulta da elevada percentagem de materiais finos, em especial a grande quantidade de cimento (NEPOMUCENO, 2005).

2.4.1. Propriedades do BAC no estado fresco

Na indústria da construção é muito importante ter a informação acerca das propriedades reológicas dos betões, isto acontece porque a generalidade das operações efetuadas envolvem o betão no seu estado fresco, sendo que nelas se identificam a amassadura, o transporte, a colocação, a compactação e o acabamento.

Comparativamente ao betão convencional, as propriedades do BAC estão associadas à auto-compactabilidade. Em termos mecânicos esta propriedade está relacionada com a reologia do betão fresco, enquanto em termos de manuseamento na prática está relacionada com os parâmetros de trabalhabilidade (NEPOMUCENO, 2005).

2.4.1.1. Trabalhabilidade

Desde a introdução do BAC nos anos 80 do século passado, muitos métodos foram propostos para efeitos de medição da trabalhabilidade dos betões auto-compactáveis. A maior parte dos testes eram de ordem empírica, onde estes pretendiam simular as condições no terreno, medindo as quantidades de trabalhabilidade (BARTOS *et al.*, 2002).

No caso concreto dos betões auto-compactáveis, a trabalhabilidade pode ser genericamente definida como a maior ou menor facilidade com que o betão é manuseado, e a maior ou menor facilidade com que este preenche todos os espaços da cofragem pela ação do seu próprio peso, conservando a sua estabilidade e uma qualidade uniforme sem defeitos (NEPOMUCENO, 2005).

A trabalhabilidade assume um carácter relativo uma vez que uma mesma mistura de betão pode ser considerada “trabalhável” sob determinadas condições específicas e não o ser noutras condições mais severas.

Uma adequada trabalhabilidade do BAC pressupõe a obtenção de uma adequada auto-compactabilidade, possível através da conjugação de parâmetros apontados na figura 2.9. Os requisitos funcionais de auto-compactabilidade incluem a capacidade de enchimento, a resistência à segregação e a capacidade de passagem (AMZIANE *et al.*, 2006; NEPOMUCENO, 2005; SHEINN, 2007).

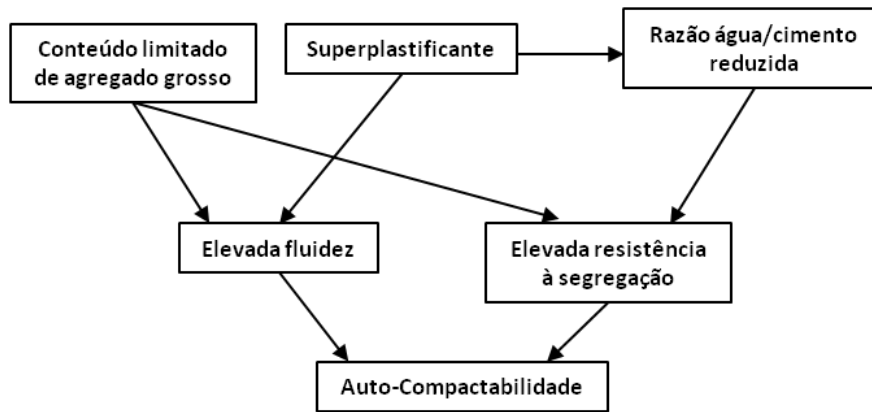


Figura 2.9 - Aproximação geral para obtenção do betão auto-compactável [adaptada de SHEINN, 2007].

A capacidade de enchimento inclui a capacidade de deformação, em termos de quão longe o betão pode fluir a partir da descarga, e a velocidade com que este se deforma. Para ser atingida uma adequada capacidade de enchimento deve-se aumentar a deformabilidade da pasta (através de adjuvantes superplastificantes e de um equilíbrio da razão água/materiais finos) e reduzir o atrito entre as partículas (através de um baixo volume de agregados grossos e uma distribuição ótima dos finos relativamente aos agregados e cimento usado) (NEPOMUCENO, 2005; SHEINN, 2007).

Uma boa resistência à segregação significa que a distribuição das partículas de agregado grosso no betão é relativamente equivalente em todas as localizações e em diferentes níveis de altura. Numa mistura resistente à segregação, as partículas de agregado grosso permanecem dispersas na matriz argamassa quando o betão auto-compactável escoar na direção horizontal, enquanto numa mistura propensa à segregação, as partículas de agregado grosso sedimentam na direção vertical ou segregam da matriz argamassa quando o betão escoar na direção horizontal. Para que seja atingida uma adequada resistência à segregação deve-se implementar estratégias como, reduzir a segregação dos sólidos (limitando a quantidade de agregados, reduzindo a máxima dimensão do agregado, baixando a razão água/materiais finos e utilizando um agente de viscosidade) e deve-se ainda minimizar a exsudação - água livre (através de uma baixa dosagem de água, assim como de uma baixa razão água/materiais finos, da utilização de materiais finos com elevada superfície específica e do uso de um agente de viscosidade) (NEPOMUCENO, 2005; SHEINN, 2007).

Relativamente à capacidade de passagem, o BAC deve possuir fluidez suficiente e ao mesmo tempo suficiente resistência à segregação para funcionar de forma eficiente. Deve evitar-se o efeito arco (formação de “pontes”) (figura 2.10) o qual é originado pela colisão entre os agregados grossos na vizinhança das aberturas estreitas, ora de armaduras ora de cofragens. Pode afirmar-se que a probabilidade deste efeito acontecer é tanto maior quanto maior for a

concentração de agregados da mistura. Para atingir uma adequada capacidade de passagem deve-se melhorar a coesão para reduzir a segregação do agregado (através de uma baixa razão água/materiais finos e de um agente de viscosidade) e compatibilizar as características das aberturas e dos agregados grossos (através de um baixo volume de agregados grossos e uma baixa dimensão máxima dos agregados) (NEPOMUCENO, 2005; SHEINN, 2007).

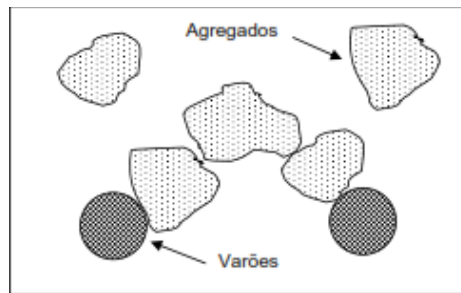


Figura 2.10 - Efeito de arco (formação de “ponte” em abertura estreita) [NEPOMUCENO, 2005].

2.4.1.2. Comportamento reológico do BAC

Vários autores referem que o comportamento do betão auto-compactável pode ser descrito com base na reologia das suspensões de partículas (NEPOMUCENO, 2005; SKARENDAHL, 1998; WESTERHOLM, 2006).

Uma vez que o betão é considerado como uma suspensão de partículas, este pode ser dividido em duas fases: fase líquida e fase sólida. Na fase líquida inclui-se geralmente a pasta de cimento, ou o cimento e a fração mais fina dos agregados finos (< 125 ou $250 \mu\text{m}$). Por sua vez, os agregados restantes, finos e grossos, compõem a fase sólida do betão (WESTERHOLM, 2006).

A reologia da pasta de cimento influencia diretamente a reologia do betão, atribuindo-lhe um esqueleto de agregado específico (COUTINHO *et al.*, 2011).

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. O comportamento reológico do BAC é definido, na sua forma mais básica, pelo modelo de Bingham, onde uma tensão de cedência é necessária para que ocorra o escoamento do material. Neste caso os dados medidos traduzem-se numa linha reta (FEYS *et al.*, 2013; REINHARDT e WÜSTHOLZ, 2006).

LARRARD e SEDRAN (1999) concluíram que tanto a tensão de cedência como a viscosidade plástica poderiam ser estimadas de forma grosseira pelo ensaio de espalhamento. Ambas as expressões a seguir apresentadas (2.9) e (2.10) foram por eles desenvolvidas.

$$\tau_0 = (808 - Sl) \cdot \frac{M \times g}{11740} \quad (2.9)$$

Em que:

Sl - Diâmetro médio de espalhamento, em mm;

g - Aceleração da gravidade;

M - Densidade, em kg/m³.

$$\eta = \frac{M \times g}{10000} \cdot (0,026 \times Sl - 2,39) \cdot T_{50} \quad (2.10)$$

Onde:

T₅₀ - Tempo que o betão demora a atingir um diâmetro de 500 mm no ensaio de espalhamento, em segundos.

As propriedades reológicas pretendidas para um BAC são as de um baixo valor da tensão de cedência juntamente com uma adequada viscosidade plástica (NEPOMUCENO, 2005). Se os valores da tensão de cedência forem demasiado baixos, pode surgir no betão uma tendência para segregação por motivo das diferentes densidades dos materiais. É muito importante em termos de análise reológica haver um equilíbrio entre resistência à segregação e fluidez, se forem pretendidos alcançar os critérios de auto-compactabilidade dos BAC (PINTO, 2011). Na figura 2.11 pode observar-se as características que os betões frescos adquirem consoante as respetivas propriedades reológicas, tensão de cedência e viscosidade plástica.

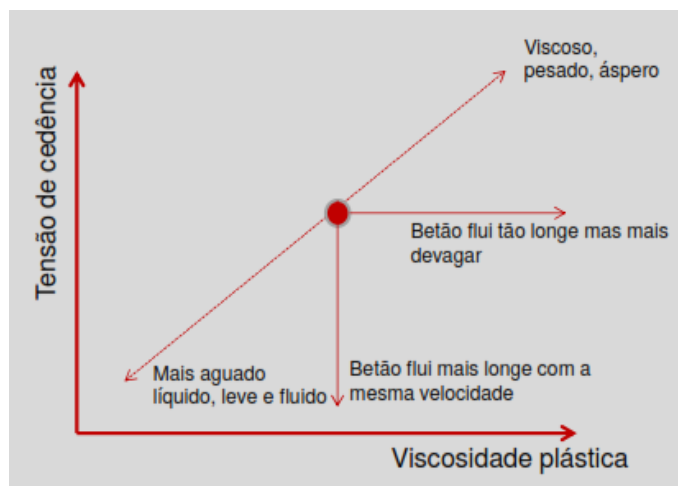


Figura 2.11 - Características do betão fresco em função da tensão de cedência e viscosidade plástica [VIEIRA, 2008].

Segundo KHAYAT e TANGTERMSIRIKUL (2000), os principais mecanismos que influenciam os parâmetros reológicos traduzem-se no atrito inter-partículas e na 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 compactação adequada das partículas finas.

Em 2008, VIEIRA (2008) afirmou que alterações nos agregados poderiam influenciar o comportamento dos BAC, em que uma diminuição do teor de agregado implicaria um decréscimo do valor da viscosidade e da tensão de cedência. Também verificou que um aumento na finura das areias provocaria um incremento na viscosidade e na tensão de cedência.

Não é simples efetuar a avaliação do comportamento reológico do betão fresco, onde uma grande diversidade de materiais na sua composição interage, e possui, cada um deles, propriedades mecânicas e físicas distintas. A avaliação de todos os efeitos, criados pela interação dos constituintes da mistura de betão, é inexequível quando está em causa o comportamento reológico dos betões através do conhecimento das propriedades individuais de cada constituinte (NP EN 206-1, 2007).

No estudo dos BAC intervém outra propriedade reológica importante, denominada tixotropia. Normalmente o BAC fresco assume um comportamento pseudoplástico (Reo-fluidificante) pois a sua viscosidade diminui quando sujeito a taxas de corte constantes. O que a tixotropia nos diz é que o material tem uma dependência pelo tempo, visto que a estrutura laminar do material recupera a sua forma original substancialmente, durante um determinado período de tempo, após a remoção das forças de corte (AMZIANE *et al.*, 2006).

Estas medições são efetuadas por reômetros e existem vários tipos deste equipamento, os quais serão apresentados no subcapítulo 2.7.1.

A propriedade tixotropia será abordada mais aprofundadamente no subcapítulo 2.5, no entender que é fulcral para o desenvolvimento do presente estudo.

2.4.2. Composição do BAC

Nos betões auto-compactáveis os materiais utilizados são essencialmente os mesmos presentes no betão corrente. Na tabela 2.2 podem ser observadas as diferenças entre os dois tipos de betões e as respetivas percentagens de cada material que os constitui. No BAC podem ser utilizadas adições para incrementar e manter a coesão e resistência à segregação do betão. Conforme o descrito nas tabelas 2.2 e 2.3, o BAC é composto basicamente por materiais finos, adjuvantes, agregados e água. Para além da composição básica do BAC, a tabela 2.3 também apresenta as respetivas características dos componentes.

Tabela 2.2 - Betão corrente vibrado versus Betão auto-compactável [adaptada de BARTOS e SONEBI, 1999].

Betão Corrente Vibrado		Betão Auto-Compactável	
Cimento	10%	Cimento + Adições	18%
Agregado fino	33%	Agregado fino	34%
Agregado grosso	37%	Agregado grosso	28%
Água	20%	Água + Superplastificante	20%

Tabela 2.3 - Composição do BAC e suas principais características.

Composição	Caraterísticas	Materiais
Materiais finos	<ul style="list-style-type: none"> - Partículas entre os 0,075 e 0,125mm. - Afetam o grau de auto-compactabilidade e as propriedades do betão no estado endurecido. 	<p>Cimento</p> <ul style="list-style-type: none"> - Altera a trabalhabilidade e a viscosidade. - Propriedades diferentes conforme a composição (alumínio, cálcio, ferro, sílica...) → Diferente adsorção. - Quanto maior a sua compacidade maior a

- Têm elevada superfície específica → Proporcionam grande capacidade de adsorver água na sua superfície.
- coesão da pasta.
- Podem usar-se todos os tipos de cimento no BAC (NP EN 197-1: 2001).

Adições tipo I (quase inertes)

- Fíler calcário: material proveniente de rochas calcárias ou jazidas aluvionares.
- Fíler granítico.

Adições tipo II (pozolânicas ou hidráulicas latentes)

- Escórias de alto-forno de elevada finura: subproduto industrial obtido na siderurgia de aço.
- Cinzas volantes e biomassa: subproduto obtido das centrais termoeléctricas quando se queimam carvões pulverizados.
- Sílica de fumo (microsílica): pó amorfo obtido a partir da siderurgia de produtos siliciosos.
- Pó de vidro.
- Resíduos potencialmente reativos: vidro colorido de garrafas e subproduto da indústria mineira em forma de lama residual.

Superplastificantes

Adjuvantes

- Material adicionado em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, durante o processo de mistura do betão (NP EN 206-1).
- Têm como objetivo modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido.
- Ter em conta as propriedades químicas e físicas na sua escolha.
- Deve verificar-se se são compatíveis com os outros constituintes do BAC.
- Componentes indispensáveis que evitam a flocculação do cimento.
- Evitam a aglomeração modificando as forças de superfície entre partículas.
- Dois grupos utilizados no BAC: agentes redutores de água de alta gama e agentes introdutores de ar.
- Recentemente surgiu uma nova geração à base de policarboxilatos modificados com maior capacidade de reduzirem a água.
- Devem garantir a fluidez e a redução de água adequadas, mantendo o efeito de dispersão das partículas durante o transporte e colocação do betão (*Guidelines Europeias de 2005*).

	<p>Agentes de viscosidade</p> <ul style="list-style-type: none"> - São adjuvantes que modificam a coesão do BAC sem alterar significativamente a sua fluidez. - Os usados no BAC são normalmente constituídos por polissacarídeos solúveis em água. - Mais comuns: derivados de celulose. <p>Introdutores de ar</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permitem aumentar a resistência do betão à ação de gelo/degelo. - Quando há falta de agregados finos, permitem corrigir a granulometria, melhorando a trabalhabilidade.
<p>Agregados</p>	<p>Agregados finos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inclui as areias. - A quantidade de adições deve ser definida em função do tipo e da granulometria. - Definir quantidade certa: a mais, reduzem a fluidez do betão e a menos podem dar origem a segregação/exsudação. <p>Agregados grossos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Incluem todas as partículas com diâmetro superior a 5mm. - O fator principal na determinação do tamanho máximo dos agregados grossos é o espaçamento entre as armaduras. A máxima dimensão dos agregados interferem diretamente na fluidez, na capacidade de passagem do betão e na quantidade de pasta do BAC (<i>Guidelines Europeias de 2005</i>).
<p>Água</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Função de hidratação do cimento. - Permite alterar a viscosidade e deformabilidade do betão fresco. - A sua dosagem deve manter-se igual de mistura para mistura.

- O seu aumento provoca um aumento da deformabilidade e uma redução da viscosidade da mistura.

2.4.3. Parâmetros condicionantes do comportamento reológico de pastas, argamassas e betões

As pastas, argamassas e betões são materiais sensíveis a diversos fatores que induzem a alterações nas suas propriedades reológicas. Após pesquisa, COUTINHO *et al.* (2011) indicaram uma lista variada de fatores nos quais se incluíam nomeadamente:

- A quantidade, a composição química e a estrutura molecular da mistura;
- A composição química do cimento (especialmente o teor de C_3A e a disponibilidade de sulfatos solúveis durante o período trabalhável);
- A superfície específica do cimento;
- A presença de adições minerais ou de outros tipos de adjuvantes;
- Aspectos tecnológicos como a potência de mistura e o caso da introdução do adjuvante;
- Aspectos ambientais como a humidade e a temperatura.

SHEINN (2007) também fez referência a outros fatores que deveriam ser previstos como garantia de um adequado comportamento reológico dos BAC, nomeadamente o volume de água nas misturas, as propriedades dos agregados finos e grossos (granulometria, gravidade específica, forma e textura superficial), e a interação entre os componentes (reação entre cimento e adjuvante químico ou mineral).

Porém, é verificada uma elevada dificuldade no momento da determinação dos principais fatores, e das interações existentes entre os distintos elementos, presentes numa suspensão cimentícia com superplastificante. Esta avaliação torna-se ainda mais complexa pois tem lugar a ocorrência de reações de hidratação no próprio cimento (COUTINHO *et al.*, 2011).

A figura 2.12 demonstra os diversos tipos de constituintes do betão, onde a microargamassa (pasta) é considerada a fase líquida e os agregados com dimensão superior a $125\ \mu\text{m}$ a fase sólida.

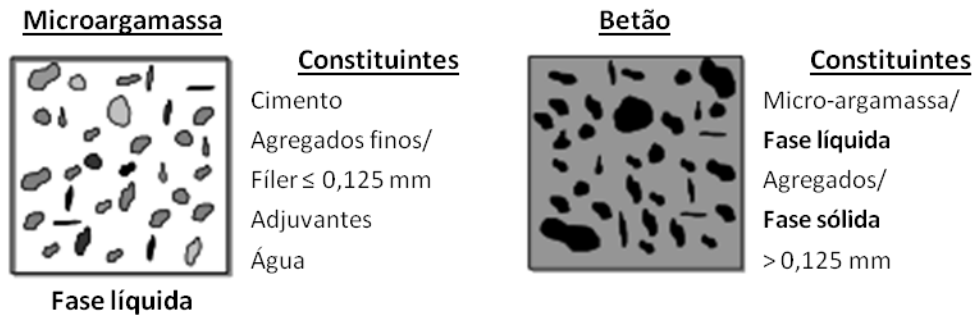


Figura 2.12 - Constituintes do betão. Microargamassa como fase líquida do betão [adaptada de BILLBERG, 1999].

Nos subtópicos seguintes apresentam-se possíveis efeitos em algumas propriedades reológicas de argamassas de betões, tendo por base diversos fatores, alguns deles anteriormente referidos.

2.4.3.1. Efeito da concentração e do tipo de partícula

Nas partículas finas utilizadas nos BAC incluem-se o cimento e as adições minerais, pozolânicas ou não pozolânicas. Entre as adições não pozolânicas ou inertes mais utilizadas para incrementar o volume de partículas finas nas misturas de BAC encontram-se a de calcário e a de dolomita (BOSILJKOV, 2003).

A adição deste tipo de materiais tem efeitos no comportamento reológico do BAC no estado fresco.

O efeito da concentração das partículas na viscosidade de uma suspensão pode ser descrito através da equação (2.11), de Krieger-Dougherty (BARNES *et al.*, 1989).

$$\eta = \eta_s \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (2.11)$$

Onde:

η_s - Viscosidade do meio de suspensão (fase líquida);

ϕ - Fração volumétrica das partículas;

ϕ_m - Fração volumétrica máxima das partículas;

$[\eta]$ - Viscosidade intrínseca.

A distribuição granulométrica e a forma das partículas desempenham um papel importante pois influenciam grandemente a concentração máxima. Além disso, na floculação, como os flóculos de partículas não se encontram arrumados de forma compacta, pode haver um abaixamento da fração volumétrica máxima das partículas, ϕ_m (WESTERHOLM, 2006).

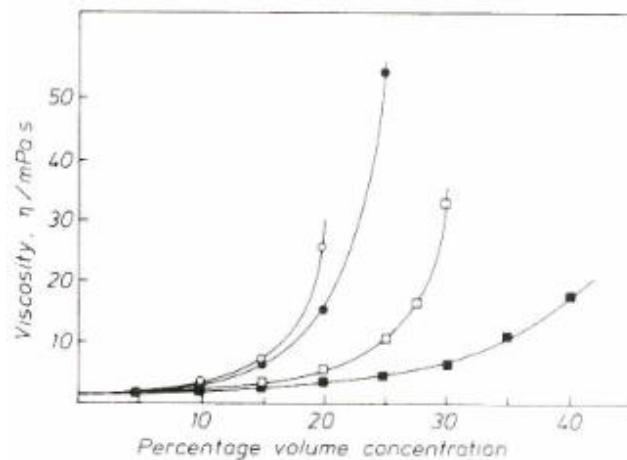


Figura 2.13 - Efeito da forma das partículas e concentração na viscosidade de suspensões de partículas a uma taxa de deformação de 300 s^{-1} (■) esfera; (□) grão; (●) prato; (○) haste [WESTERHOLM, 2006].

Vários autores como, STRUBLE e SUN (1995), e JUSTNESS e VIKAN (2005), citados por WESTERHOLM (2006), estudaram o comportamento do escoamento de pastas de cimento Portland dispersas e também floculadas. A todos eles os resultados permitiram concluir que a relação entre viscosidade e concentração podia ser descrita pela equação de Krieger-Dougherty (2.11). Na figura 2.13 pode ser observada a variação da viscosidade em diferentes pastas floculadas, sendo que a viscosidade apresenta valores significativamente maiores quando as pastas estão mais concentradas. Também se observa que a fração volumétrica máxima influencia o limite da viscosidade.

2.4.3.2. Efeito das características do cimento

O cimento como material utilizado em suspensões apresenta um parâmetro importante, a finura, que afeta as propriedades reológicas das mesmas. O referido parâmetro, e a composição química do cimento, variam muitas vezes quando solicitadas nas misturas. Esta observação é verificada ao comparar o efeito de diferentes cimentos, e desta variação depreende-se que o efeito exclusivo da finura, não é de fácil avaliação (BANFILL e TATTERSALL, 1983).

O efeito da finura do cimento foi avaliado por VOM BERG (1979), através de um procedimento de separação do cimento em frações individuais e posterior recombinação criando “novos” cimentos com uma distribuição de dimensão das partículas diferente (diferentes finuras). No estudo, os cimentos apresentavam uma variação da área de superfície específica entre os 130 m²/kg e os 690 m²/kg. Do trabalho de investigação foi demonstrado que tanto a viscosidade inicial como a tensão de cedência aumentavam com um incremento da área de superfície específica, a uma concentração sólida constante. Os mesmos resultados foram obtidos quando ocorria um incremento da concentração sólida, a uma área de superfície específica constante.

Outro autor, VIKAN (2005) chegou a resultados semelhantes aos de VOM BERG (1979) do efeito da finura por meio de uma avaliação de quatro cimentos produzidos do mesmo tipo de clínquer, com a diferença de todos os cimentos terem sido moídos até possuírem diferentes finuras. As superfícies específicas variavam entre os 356 m²/kg e os 496 m²/kg.

O fato das propriedades do escoamento da pasta de cimento dependerem de diversos parâmetros (finura, conteúdo de aluminato tricálcico C₃A, etc.), torna impossível uma avaliação do efeito dos diferentes cimentos a partir de apenas um desses fatores (VIKAN, 2005). VIKAN (2005) veio a descobrir uma correlação linear entre as características combinadas do cimento (traduzidas pela equação (2.12)) e a resistência ao escoamento da pasta de cimento.

$$Blaine \cdot [d \cdot \{cubic C_3A\} + (1 - d) \cdot \{C_3S\}] \quad (2.12)$$

Onde:

{ } - Quantidade relativa de C₃A e de silicato tricálcico C₃S, em percentagem;

d - Fator representativo da reatividade relativa do C₃A e do C₃S.

A resistência ao escoamento, definida pela área abaixo da curva de escoamento, medida com o recurso a um reómetro equipado com um sistema de medição de placas paralelas, foi função linear ou exponencial das características do cimento, dependentes do tipo de plastificante e dosagem (WESTERHOLM, 2006).

Resultados semelhantes foram obtidos por GRIESSER (2002), descobrindo um valor da tensão de cedência relativa, através da correlação entre as quantidades de silicato dicálcico (C_2S) e C_3A , multiplicado pelo valor da superfície de Blaine (equação (2.13)).

$$(C_2S + C_3A) \cdot Blaine \quad (2.13)$$

2.4.3.3. Efeito do superplastificante

Os superplastificantes são polímeros solúveis em água, os quais passam por um complexo processo de polimerização, sofrendo uma sintetização, de forma a produzir moléculas longas de massa molecular elevada. Estas moléculas longas têm o propósito de envolver as partículas de cimento e de adições, para induzir-lhes cargas negativas elevadas. Isto faz com que as partículas não se aglomerem, repelindo-se umas às outras (SHEINN, 2007).

Normalmente existe uma não uniformidade de espalhamento dos grãos de areia pela fase aquosa das misturas, havendo tendência para formação de pequenos flóculos que aprisionam água dentro deles. Para garantir essa uniformidade de distribuição, e para que não ocorra segregação, são normalmente implementados os adjuvantes dispersores. Isto origina uma redução drástica nos valores da tensão de cedência para um determinado volume de água, e um aumento na fluidez (redução relativamente pequena da viscosidade plástica) das misturas (COUTINHO *et al.*, 2011; SHEINN, 2007). WESTERHOLM (2006) obteve no seu estudo resultados que estavam de acordo com COUTINHO *et al.* (2011) e SHEINN (2007), como se pode verificar graficamente nas figuras 2.14 e 2.15, a influência de superplastificantes na tensão de cedência e na viscosidade plástica das argamassas, respetivamente.

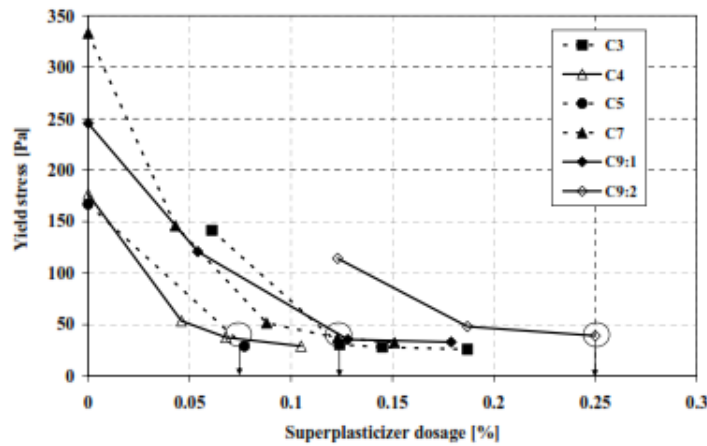


Figura 2.14 - Tensão de cedência versus dosagem de superplastificante [WESTERHOLM, 2006].

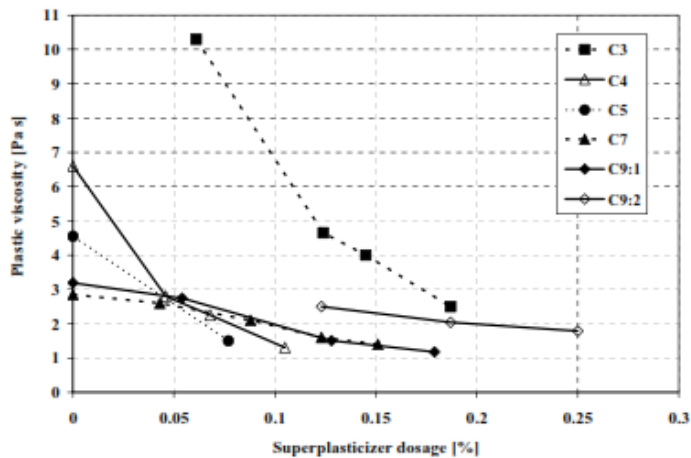


Figura 2.15 - Viscosidade plástica versus dosagem de superplastificante [WESTERHOLM, 2006].

2.4.3.4. Efeito da razão a/c

A reologia de argamassas é largamente afetada pelo volume de água presente nas misturas. A adição de água numa argamassa leva a que ocorra um abaixamento tanto da tensão de cedência como da viscosidade. Porém, em caso de perda extrema de água, a mistura sofre um abaixamento da viscosidade tal, que as partículas da mistura podem ser levadas à segregação. COUTINHO *et al.* (2011) afirmaram que a redução do volume de água numa mistura cimentícia origina a redução da razão água/cimento, e por sua vez reduz igualmente a fluidez (mistura adquire maior viscosidade plástica e tensão de cedência cresce).

A água livre pode ser definida pelo volume total de água na mistura que não é absorvida pela mesma, nem adsorvida pela superfície das partículas sólidas (SHEINN, 2007).

Nas figuras 2.16 e 2.17 podem observar-se claramente variações da tensão de cedência e da viscosidade plástica, respetivamente, consoante o maior ou menor volume de água nas argamassas cimentícias. As modificações destas propriedades reológicas vão de acordo com o que foi reportado por COUTINHO *et al.* (2011).

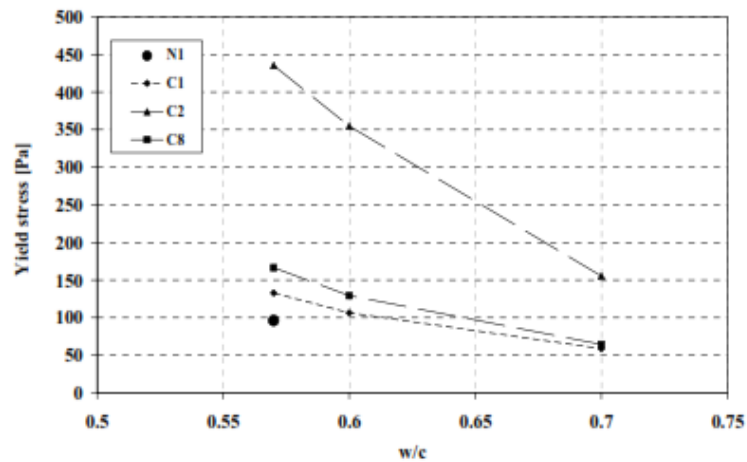


Figura 2.16 - Efeito da razão a/c na tensão de cedência de diferentes argamassas [WESTERHOLM, 2006].

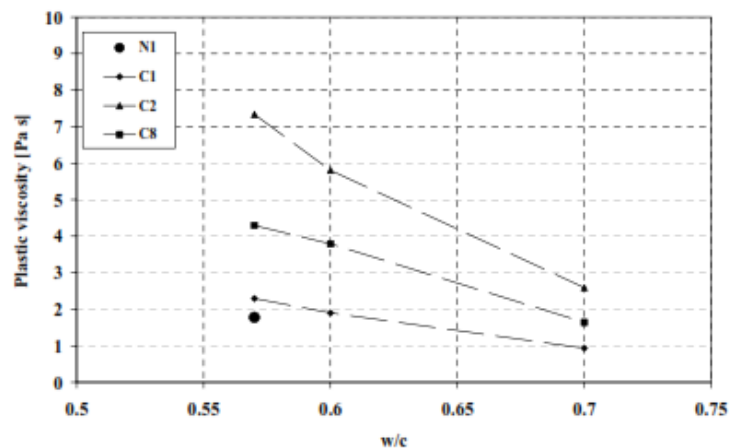


Figura 2.17 - Efeito da razão a/c na viscosidade plástica de diferentes argamassas [WESTERHOLM, 2006].

2.4.3.5. Efeito dos agregados finos e grossos

De acordo com BANFILL (2003) a argamassa é considerada como sendo um betão no estado fresco, sem o agregado grosso. Esta pode dividir-se em microargamassa (ou pasta) e em argamassa dependendo da fração granulométrica do agregado que é incluído na mistura.

Os diferentes agregados, finos e grossos, utilizados na produção do BAC possuem propriedades físicas (granulometria, gravidade específica, forma e textura superficial) que afetam os parâmetros reológicos (SHEINN, 2007).

No seu estudo WESTERHOLM (2006) obteve resultados que demonstraram uma forte influência das propriedades dos agregados finos na tensão de cedência e na viscosidade plástica de diferentes argamassas (figura 2.18). Estes parâmetros, tensão de cedência e viscosidade plástica, variaram entre 96 Pa e 550 Pa, e 1,3 Pa.s e 8,8 Pa.s, respetivamente. Para além disto concluiu que as argamassas incluindo agregado fino oriundo da trituração de rocha apresentavam na generalidade valores mais elevados da tensão de cedência e também da viscosidade plástica, comparativamente à argamassa N1 considerada de referência, com agregados finos naturais. Pode afirmar-se que esta diferença em ambos os parâmetros reológicos se deveu à forma mais irregular das partículas e também à maior quantidade de finos presentes no agregado fino triturado.

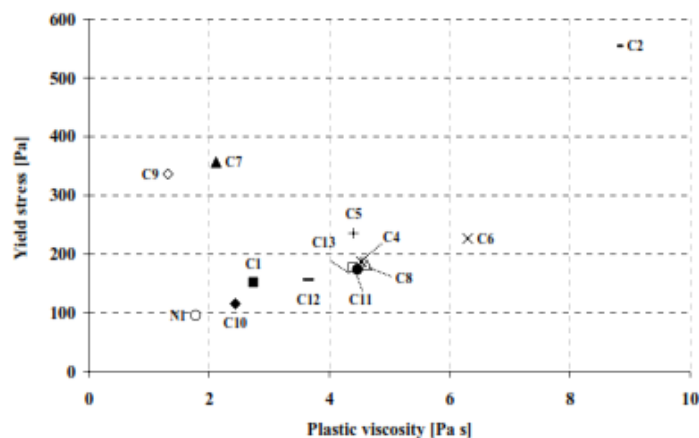


Figura 2.18 - Influência de diferentes tipos de agregados finos no comportamento reológico de argamassas [WESTERHOLM, 2006].

Como já havia sido referido neste capítulo, VIEIRA (2008) documentou que a diminuição do teor de agregado nas argamassas implicava uma diminuição conjunta dos valores da

viscosidade plástica e da tensão de cedência. Verificou também que um incremento na finura das areias provocava um aumento dos valores desses mesmos dois parâmetros reológicos. As suas afirmações, relativas à diminuição do teor de agregado, vão de acordo com as de WESTERHOLM (2006), onde este obteve como resultado gráficos representativos das variações da tensão de cedência e da viscosidade plástica com o volume de pasta existente em argamassas (figuras 2.19 e 2.20). Uma argamassa que possua menor teor de agregado apresenta maior volume de pasta, e vice-versa.

HASHIMOTO *et al.* (1999) também afirmou que um aumento na razão entre volume de agregado e o volume de pasta levaria a um aumento dos tempos de escoamento no ensaio do Funil-V.

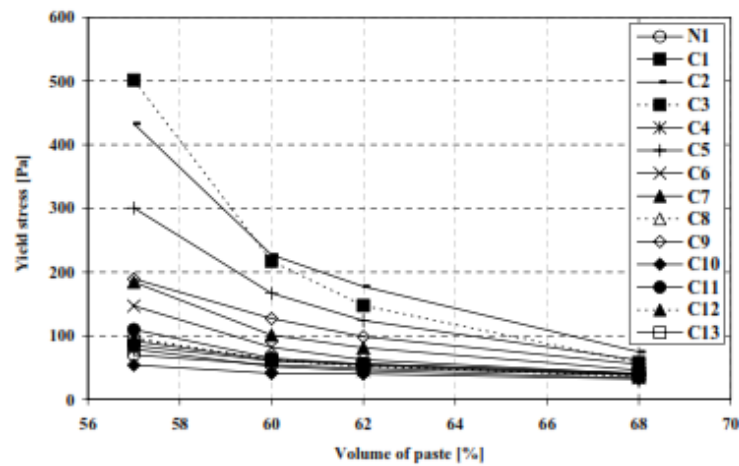


Figura 2.19 - Tensão de cedência versus volume de pasta [WESTERHOLM, 2006].

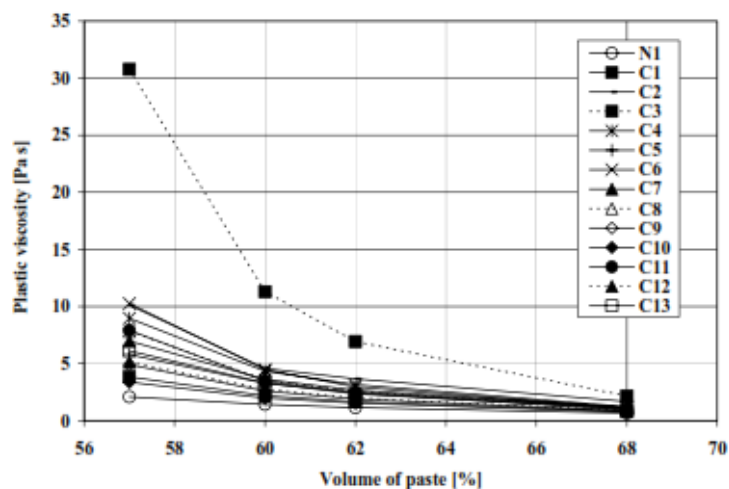


Figura 2.20 - Viscosidade plástica versus volume de pasta [WESTERHOLM, 2006].

2.4.3.6. Efeito combinado do tempo e da temperatura

A combinação dos dois fatores, tempo e temperatura, é muito importante no betão auto-compactável devido à qualidade atualmente exigida ao mesmo, de uma combinação perfeita entre uma adequada resistência à segregação e uma excelente fluidez. A descoberta de que a temperatura ambiente influenciava diretamente a trabalhabilidade do BAC, levou a maiores cuidados na manipulação do betão, ainda mais porque se sabia de antemão que ocorriam frequentemente atrasos na entrega dos betões em obra (DUTHOIT *et al.*, 2000). Assim, e com o aparecimento de novas gerações de betões, com diferentes composições, torna-se cada vez mais importante a previsão da evolução dos parâmetros reológicos, pois está provado que estes dependem das condições de betonagem (KHAYAT *et al.*, 2007; KHAYAT *et al.*, 2009).

Dos ensaios efetuados por KHAYAT *et al.* (2007), foram obtidos resultados que indicaram que a tensão de cedência e a viscosidade plástica nas misturas de argamassa variam de uma forma linear com o tempo (figura 2.21), enquanto nos betões auto-compactáveis os parâmetros reológicos variam de uma forma exponencial, como ilustrado na figura 2.22. Pode afirmar-se que independentemente das temperaturas registadas a que se encontram as argamassas e os betões, ocorre sempre o incremento da tensão de cedência e da viscosidade plástica com o avançar do tempo. A temperatura apenas influencia o tempo que as misturas de argamassa ou de betão demoram a atingir um determinado valor destes parâmetros reológicos.

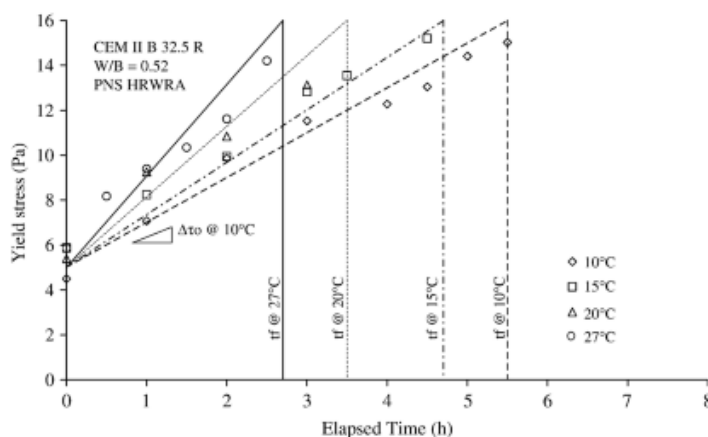


Figura 2.21 - Variação da tensão de cedência em argamassas M1 produzidas com adjuvante PNS HRWRA de acordo com o tempo registado e temperaturas entre 10 e 27 °C [KHAYAT *et al.*, 2007].

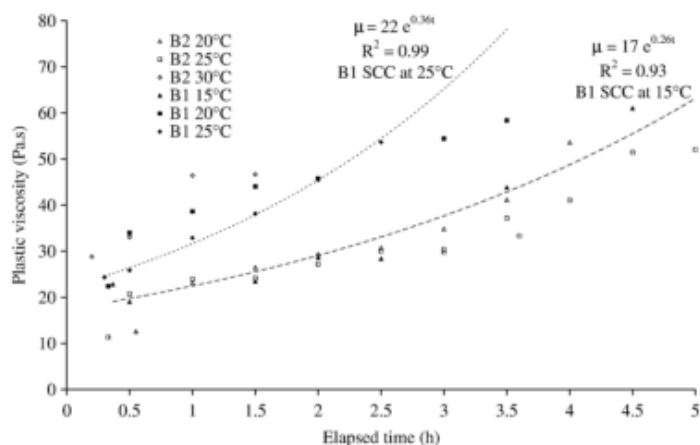


Figura 2.22 - Variação da viscosidade plástica em betões B1 e B2 de acordo com o tempo registado e temperaturas entre 20 e 30 °C [KHAYAT *et al.*, 2007].

Em forma de conclusão do subcapítulo 2.4.3, referente aos parâmetros condicionantes do comportamento reológico de pastas, argamassas e betões, apresenta-se a tabela 2.4 com um resumo de efeitos que possíveis alterações nas misturas podem ter ao nível dos parâmetros reológicos tensão de cedência e viscosidade plástica.

Tabela 2.4 - Resumo dos efeitos nos parâmetros reológicos de argamassas, provocados por determinado tipo de alteração nas misturas.

Alteração efetuada	Efeito observado	
	Tensão de cedência	Viscosidade plástica
Aumento da concentração de cimento	Aumenta	Aumenta
Aumento da superfície específica do cimento	Aumenta	Aumenta
Aumento da finura da areia	Aumenta	Aumenta
Aumento do volume de água	Decresce	Decresce
Aumento do tempo	Aumenta	Aumenta
Aumento da temperatura	Acelera o aumento	Acelera o aumento
Aumento do volume de pasta/ Diminuição do teor de agregado	Decresce	Decresce
Adição de superplastificante	Decresce	Decresce pouco
Adição de agregados finos triturados	Aumenta	Aumenta
Adição de introdutor de ar	Varia pouco	Decresce
Substituição de parte do cimento por:		
Cinza volante	Decresce	Decresce
Micro sílica	Aumenta	Decresce

2.5. Tixotropia

O termo tixotropia foi pela primeira vez introduzido por Peterfi no ano de 1927 (BARNES, 1997) onde fazia a descrição da transformação isoterma e reversível de um material, de gel para líquido, através de vibração mecânica (figura 2.24). Etimologicamente a palavra tixotropia deriva de duas palavras gregas “thixis” (mexer, abanar) e “trepo” (variação, mudança).

Existem diferentes definições para tixotropia, sendo que duas das definições são mais dominantes. Na Enciclopédia Nacional Sueca a tixotropia é definida pela “Propriedade de um produto tipo-gel ou viscoso em que se torna mais líquido conforme maior tempo e maior vigor esteja sendo deformado. A tixotropia é causada pela dependência, de tempo e de força, das mudanças estruturais do produto. O produto volta a readquirir a sua condição original tipo-gel quando a deformação é terminada” (BILLBERG, 2006).

Outra definição de tixotropia foi implementada em 1967 por BAUER e COLLINS (1967), onde “Quando ocorre uma redução reversível e isoterma na magnitude das propriedades reológicas de um sistema, como o módulo de elasticidade, tensão de cedência, e viscosidade, por exemplo, com uma distinta dependência do tempo na aplicação da extensão de corte, o sistema é descrito como tixotrópico” (BILLBERG, 2006).

Os fluidos tixotrópicos apresentam um comportamento Reo-fluidificante ou pseudoplástico, combinado com uma dependência do tempo. A viscosidade neste tipo de fluidos diminui quando sujeita a uma velocidade de corte constante. Outra característica da viscosidade é que esta muitas vezes recupera substancialmente durante um período de tempo, após serem removidas as forças de corte (AMZIANE *et al.*, 2006; KEALY, 2007b; WESTERHOLM, 2006).

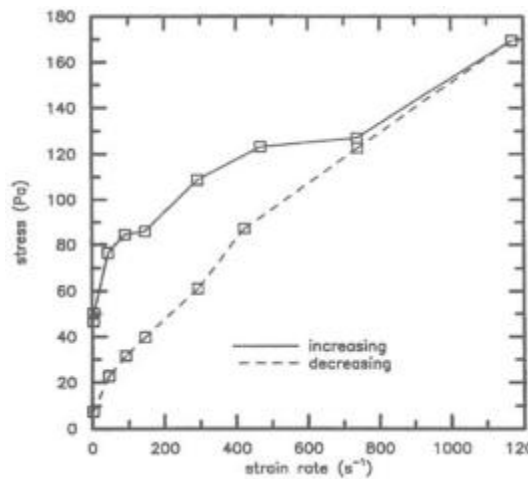


Figura 2.23 - Curva de escoamento para pasta de cimento demonstrando histerese tixotrópica quando velocidade de corte é aumentada e posteriormente reduzida [BEAUDOIN e RAMACHANDRAN, 2000].

Na figura 2.23, observa-se uma curva de escoamento tipicamente produzida por suspensões tixotrópicas. Nas suspensões cimentícias a hidratação também produz histerese. A diferença de área registada entre as curvas crescente e decrescente reflete a falta de equilíbrio entre a microestrutura e a taxa de deformação, e isto acontece com muita regularidade, face à quebra da microestrutura durante a fase de corte (BEAUDOIN e RAMACHANDRAN, 2000; BILLBERG, 2006; CASTRO *et al.*, 2011).

Quando os fluidos exibem características pseudoplásticas combinadas com uma dependência do tempo, mas que a sua viscosidade aumenta quando são sujeitos a velocidade de corte constante, são denominados por reopéticos. Após a remoção das forças de corte, este tipo de fluidos também acaba por recuperar a sua forma estrutural original, ao longo dum período de tempo (KEALY, 2007b).

Segundo SUHR (1991), o volume de histerese, cuja área é representativa do trabalho relacionado com o volume de material cisalhado, permite uma análise qualitativa do cisalhamento, sendo então possível retirar conclusões quanto à estabilidade estrutural destes materiais.

Porém, são raros os documentos que fazem referência à tixotropia. O principal motivo está relacionado com a limitação geométrica imposta pela dimensão das partículas grossas que impossibilitam a utilização dos reómetros absolutos no estudo deste parâmetro reológico (ORDÓÑEZ-BELLOC *et al.*, 2013).

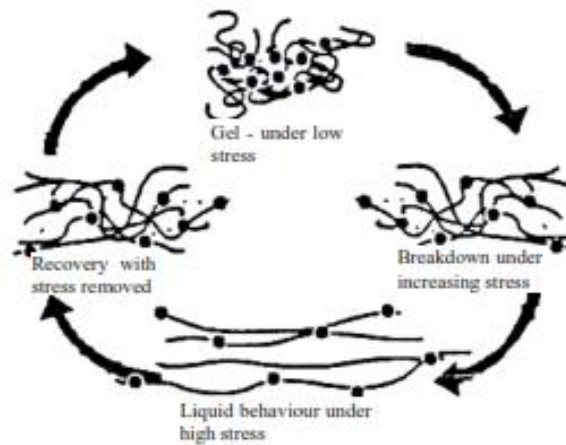


Figura 2.24 - Modelo para o comportamento tixotrópico [REES, 1995] citado por BILLBERG (2006).

2.5.1. Comportamento tixotrópico típico

Na generalidade todos os líquidos possuindo uma microestrutura podem demonstrar propriedades tixotrópicas, isto porque a tixotropia é considerada a capacidade que um material possui para ir de um estado estrutural para outro e readquirir o estado inicial durante um determinado período de tempo.

O tempo necessário para que ocorra uma deformação estrutural é normalmente considerado mais curto do que o tempo exigido para a reaquisição da forma inicial da estrutura (BILLBERG, 2006).

De entre diversas formas de descrever o comportamento dos materiais tixotrópicos, a mais apropriada é descrevendo a resposta do material em tensão de corte (τ) devido a uma deformação infligida, ou talvez em alternativa, uma velocidade de corte ($\dot{\gamma}$).

As figuras 2.25 - 2.28, apresentadas por BILLBERG (2006) representam as diferentes relações entre velocidade de corte e tensão de corte para materiais tixotrópicos.

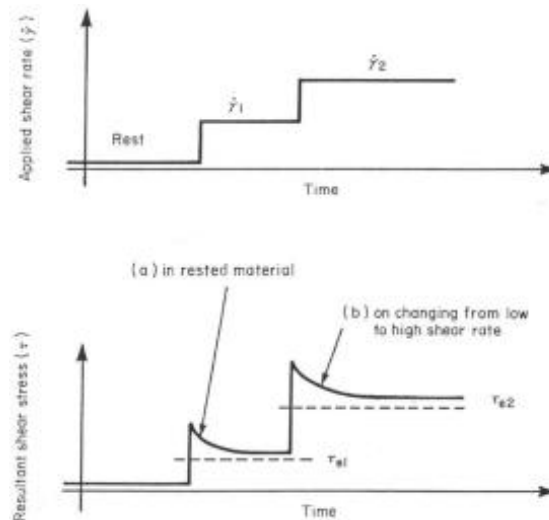


Figura 2.25 - Aumento faseado da velocidade de corte com resposta do material em forma de tensão de corte reduzida quando a velocidade de corte é constante [CHENG, 1987].

Na figura 2.25 pode observar-se um teste a um material que repousou por algum tempo quando de repente é sujeito a uma velocidade de corte $\dot{\gamma}_1$. A resposta em tensão de corte é elevada inicialmente, mas se a velocidade de corte permanecer constante, a tensão de corte irá decrescer gradualmente com o tempo. Se a velocidade de corte variar agora repentinamente para um valor superior $\dot{\gamma}_2$, a resposta da tensão de corte irá ser novamente elevada mas decresce com o tempo. A tensão de corte vai, se o tempo a uma velocidade de corte constante é suficientemente longa, em ambos os casos atingem os valores de equilíbrio τ_{e1} e τ_{e2} , respetivamente. Neste caso o comportamento tixotrópico típico é aquele onde a tensão de corte (ou a viscosidade η (Pa.s), se for considerada a relação $\eta = \tau / \dot{\gamma}$) decresce a uma velocidade de corte constante (BILLBERG, 2006).

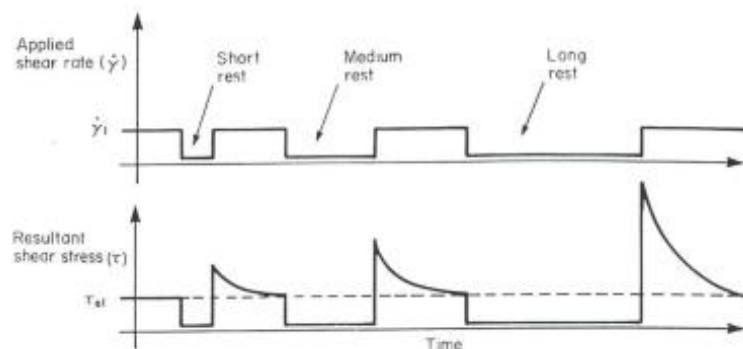


Figura 2.26 - Reorganização estrutural dependendo do tempo de repouso [CHENG, 1987].

Outra forma de caracterização do comportamento tixotrópico é a sua habilidade para reorganizar a estrutura em repouso. Na figura 2.26 é mostrado, como um material depois de um pouco tempo de repouso é sujeito a uma velocidade de corte $\dot{\gamma}_1$ (igual à velocidade de corte anterior ao repouso) e como a tensão de corte aumenta diretamente para um pico de valor e depois decresce de volta ao valor equilíbrio τ_{e1} . Se agora o material for mantido num repouso um pouco mais prolongado e depois sujeito a uma mesma velocidade de corte $\dot{\gamma}_1$, a tensão de corte atinge um valor de pico mais elevado que o anterior, e com o tempo a tensão regressa ao valor τ_{e1} . Continuando com a sequência, se o material repousar por um tempo consideravelmente mais longo antes de ser “cortado” pela velocidade $\dot{\gamma}_1$, pode observar-se que a tensão de corte alcança um valor de pico ainda mais elevado do que o anterior. Concluindo, pode afirmar-se que o nível da estrutura no material fica cada vez mais alto consoante um maior período de tempo de repouso que é permitido (BILLBERG, 2006).

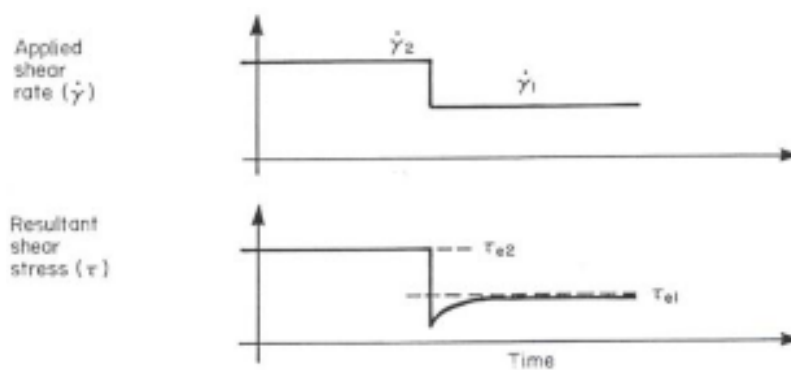


Figura 2.27 - Reorganização estrutural quando a velocidade de corte é reduzida [CHENG, 1987].

Uma forma diferente de caracterizar a reorganização estrutural é sujeitando um material a uma velocidade de corte $\dot{\gamma}_2$, a qual depois se reduz repentinamente até $\dot{\gamma}_1$ (figura 2.27). De um valor da tensão de corte equilibrado τ_{e2} , com uma velocidade de corte mais alta $\dot{\gamma}_2$, a tensão de corte (assim como a viscosidade) cai para um valor inferior ao do nível de equilíbrio τ_{e1} correspondendo à velocidade de corte $\dot{\gamma}_1$, mais baixa. Sendo assim, com uma velocidade de corte constante $\dot{\gamma}_1$ ao longo do tempo, começa a ocorrer uma reorganização estrutural no material até ser atingido o nível de equilíbrio τ_{e1} (BILLBERG, 2006).

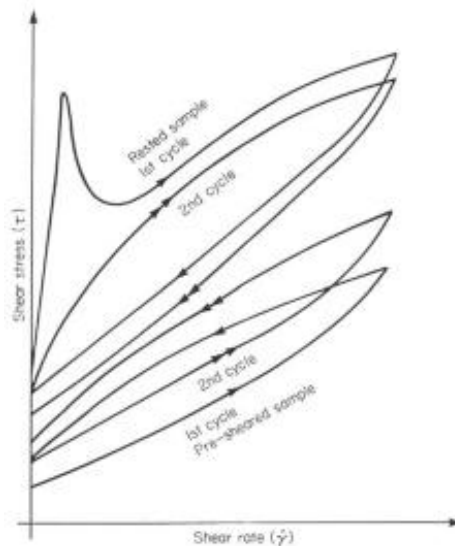


Figura 2.28 - “Loops” de histerese quando o material é sujeito ao corte cíclico [CHENG, 1987].

Na figura 2.28 é apresentada outra característica de comportamento tixotrópico dos materiais. Nesta, a velocidade de corte é continuamente incrementada de zero até um determinado valor, e depois continuamente reduzida de volta até zero. As designadas curvas de fluxo, onde as tensões de corte criam curvas ascendentes (indo por cima) e curvas descendentes (vindo por baixo), acabam por formar um “Loop” de histerese, isto é, as tensões de corte na curva ascendente de cima são maiores que as existentes na curva descendente de baixo. Isto significa que a estrutura deformada com a aplicação de uma velocidade de corte crescente, não recuperou durante a velocidade de corte decrescente. Ao repetir o processo, os “Loops” seguintes serão deslocados para baixo ao encontro do eixo dos x até atingir o nível de equilíbrio. Se o material sofrer um corte a um nível considerado mais elevado, a estrutura irá deformar mais adiante, e se sujeito a um “Loop” de velocidade de corte idêntica à anterior (quando o estado de equilíbrio foi atingido), pode resultar numa “Loop” de histerese negativo, ou seja, a curva descendente retorna por cima da curva ascendente. Este “Loop” completo será então mais reduzido que o do nível de equilíbrio. Ao repetir o processo novamente, o mesmo nível de equilíbrio anterior será eventualmente alcançado (mas desta vez os “Loops” consecutivos serão deslocados para cima) (BILLBERG, 2006).

2.5.2. Como medir a tixotropia - Metodologias

A medição da tixotropia de um material em termos fundamentais e absolutos é uma tarefa muito difícil de efetuar, isto porque a resposta tixotrópica depende fortemente da história de

corde do material. Em 1983 BANFILL e TATTERSALL (1983) chegaram mesmo a relatar que os resultados que envolviam a técnica do teste “Loop”, onde a descrição detalhada de como estes eram efetuados, foram considerados inválidos ou sem valor. Assim, a utilização de procedimentos que envolvam esta metodologia são direcionados apenas para medições relativas.

Para a realização de medições tixotrópicas existem diversos métodos documentados. Um dos métodos mais frequentemente utilizado é o de aplicar diferentes velocidades de corte, mas constantes, e fazer a medição da deformação estrutural com o tempo (figura 2.29).

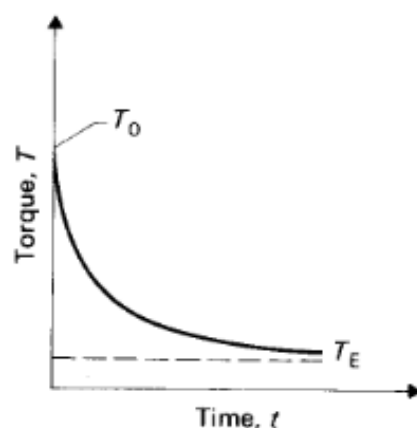


Figura 2.29 - Deformação estrutural a uma constante taxa de deformação [BANFILL e TATTERSALL, 1983].

Outro método de avaliação reológica é o do chamado teste “Loop”. Este consiste na aplicação ao material de uma contínua e crescente velocidade de corte, e novamente uma contínua velocidade de corte até atingir o valor zero. Basicamente, se o material for tixotrópico os registos para a curva ascendente das tensões de corte serão mais elevados do que os valores da tensão na curva descendente (figura 2.30) (BILLBERG, 2006; KEALY, 2007b).

Em 1998, NIELSSON e WALLEVIK (1998), descreveram que a área entre as curvas ascendente e descendente (ver gráfico à direita na figura 2.30) tem a dimensão “energia” em relação ao volume de material testado indicando a energia necessária para deformar a estrutura. No entanto, estes autores também afirmam que esta área não representa nenhuma propriedade material característica, visto que a história de corte do material e o grau de dispersão influenciam de um modo significativo o tamanho da área.

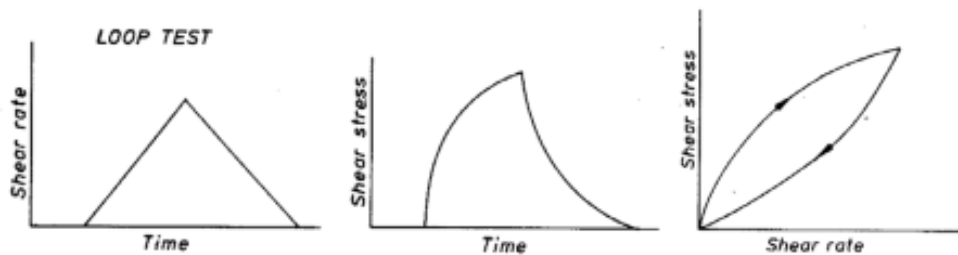


Figura 2.30 - Princípio do teste “Loop” [BARNES *et al.*, 1989] citado por BILLBERG (2006).

O último método a descrever é um método dinâmico (WINNEFELD, 2002), no qual o material é sujeito a deformações oscilantes (amplitudes), ou seja, sendo sujeito tensões de corte oscilatórias (figura 2.31). É essencial efetuar estas medições na designada região viscoelástica linear onde existe uma relação linear entre deformação e tensão no material, isto é, o material comporta-se elasticamente. Como as deformações são pequenas e permanecem dentro da região viscoelástica linear, é possibilitada a medição do grau da estrutura sem esta ser destruída. Os materiais são caracterizados pelas seguintes quantidades:

- Módulo de armazenamento - G' , representa a resposta elástica (reversível) do material;
- Módulo de perda - G'' , representa a resposta viscosa, tipo-líquido (irreversível).

É a partir do ângulo de (perda) fase δ que estes dois módulos podem ser separados, onde:

$\delta = 0^\circ$ - Descreve um material totalmente elástico;

$\delta = 90^\circ$ - Descreve um material totalmente viscoso;

$0^\circ < \delta < 90^\circ$ - Considerado um material viscoelástico.

A equação (2.14) relaciona os três parâmetros descritos:

$$\delta = \frac{G''}{G'} \quad (2.14)$$

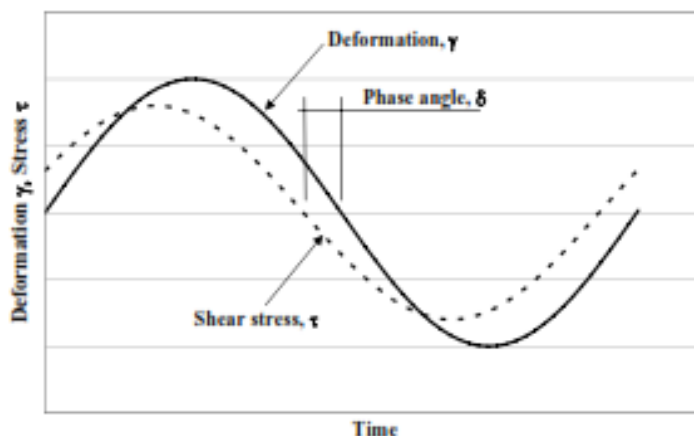


Figura 2.31 - Princípio da medição dinâmica (oscilatória) [BILLBERG, 2006].

2.6. Agregados finos reciclados

No presente trabalho houve a intenção de aferir a viabilidade dos agregados finos reciclados de betão (AFRB) através de um estudo das propriedades reológicas, de argamassas de BAC que os incorporassem.

Em termos históricos, as primeiras investigações acerca deste tipo de material, e da reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD), aconteceram durante a fase crítica seguinte à 2ª Guerra Mundial, tendo obviamente lugar nos países mais assolados pelo conflito (Alemanha, Japão, Reino Unido e União Soviética) (EVANGELISTA, 2014). Em 1978, NIXON (1978) concluiu que o uso de agregados finos reciclados de betão não aparenta influenciar particularmente a resistência à compressão dos betões com eles produzidos, apesar de reduzir significativamente a sua trabalhabilidade. HANSEN (1986) refere que as frações abaixo de 2 mm devem ser eliminadas para efeitos de produção de betão a partir dos agregados reciclados. Em 1994, GOTTFREDSSEN e THOGERSEN (1994) referem que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados é apenas relevante para partículas de dimensão superior a 4 mm. Em 1994, o uso de agregados finos reciclados (AFR) é limitado uma vez que o conhecimento sobre o desempenho dos betões com eles produzidos é insuficiente (RILEM, 1994).

2.6.1. Regulamentação existente para utilização de AFR

A utilização de agregados reciclados depende das regras e procedimentos estabelecidos para o seu uso e depende de país para país. Têm sido implementadas especificações novas ou adendas que estabelecem os limites de utilização e os critérios de aceitação para o uso em betões.

Conforme apresentado na tabela 2.5, existem países que preveem a utilização de AFR até 100%, embora com algumas limitações. No caso da Suíça o seu uso está limitado ao betão simples, no Japão a fundações pouco exigentes e na Rússia não pode ser utilizado em betão pré-esforçado. Apenas na América pode ser usado para qualquer tipo de betão. No Brasil é possível incluir até 100% de AFR desde que o betão seja não estrutural e na Holanda desde que os agregados grossos sejam naturais (AGN). Na Bélgica os AFRB têm de possuir características similares aos agregados finos naturais (AFN). Já no caso da Dinamarca permite-se a inclusão de até 20% de AFR, com limitação da resistência máxima (EVANGELISTA, 2014).

Nas restantes normas analisadas, onde se inclui Portugal e outros países como a China, Alemanha, Espanha, Hong Kong e Reino Unido, o uso de AFR é estritamente proibido, seja qual for a sua natureza ou destino a dar ao betão.

Tabela 2.5 - Lista geral das especificações nacionais acerca do uso de AFR em betões [EVANGELISTA, 2014].

País	Tipo de AFR	Máxima% de AFR	$f_{c,max}$ BAFR (MPa)	Nota
Alemanha	-	0	-	Apenas AGR
Bélgica	AFRB	100	37	Se possuírem características similares aos AFN
Brasil	AFRB/AFRI	100	15	Sem funções estruturais
China	-	0	-	Apenas AGR
Dinamarca	AFRB/AFRI	20	40/20	Ambientes não agressivos
Espanha	-	0	-	Apenas AGR
EUA	AFRB	100	Sem limite	Pode ser usado para qualquer tipo de betão
Holanda	AFRB/AFRI	100	50/25	Apenas se usado com AGN
Hong Kong	-	0	-	Apenas AGR
Japão	AFRI	100	18	Fundações pouco exigentes
Portugal	-	0	-	Apenas AGR
Reino Unido	-	0	-	Apenas AGR
Rússia	AFRI	50/100	15/20	Não pode ser usado em betão pré-esforçado
Suíça	AFRB/AFRI	100/20	37/-	Limitado no caso do betão pré-esforçado / Apenas betão simples

AFRB - Agregados finos reciclados de betão; AFRI - Agregados finos reciclados indiferenciados

Mais recentemente, apesar das limitações impostas, alguns trabalhos científicos têm mostrado que a utilização de AFR em betões estruturais pode ser efetuada, mantendo as características destes dentro dos padrões aceitáveis.

2.6.2. Produção e tratamento dos AFR

Os agregados finos reciclados surgem normalmente da trituração dos resíduos de construção e demolição (RCD) como um subproduto não desejado, uma vez que contém contaminantes. Se esses mesmos contaminantes forem separados na origem dos RCD, os AFR podem vir a ser utilizados. A composição dos AFR depende também da origem dos RCD e do seu processo de cominuição.

A qualidade dos agregados reciclados depende do seu processo de fabrico e de tratamento, por isso, têm sido desenvolvidas metodologias para melhorar o desempenho para que mais facilmente se possam utilizar em betões. Foram desenvolvidos com sucesso estudos para o melhoramento de AGR, no entanto não se conhecem trabalhos semelhantes aplicados aos AFR.

Um princípio básico para o melhoramento dos AFR passa por assumir que o processo de cominuição dos mesmos tem de ser semelhante ao aplicado aos AFN. Em 2011, RODRIGUES (2011) procedeu ao levantamento dos diagramas de processamento de diversas centrais de reciclagem Portuguesas e concluiu que, na maioria, os AR produzidos são apenas sujeitos a uma britagem primária, havendo poucas que procedem a trituração secundária. No mesmo ano, ULSEN (2011) produziu AFR recorrendo a técnicas utilizadas em separação e cominuição de minérios, obtendo AFR melhorados com características mais próximas dos AFN. Para tal, procedeu a uma trituração terciária, constituída por trituração inicial da central de reciclagem, seguida por trituração por mandíbulas e finalmente por trituração efetuada por britador de impacto vertical. Posteriormente os produtos resultantes foram melhorados com recurso a técnicas de atrição para remoção da pasta de cimento. Foram também efetuados estudos de separabilidade, quer por densidade, quer por magnetismo, dos AFR. Resultados obtidos por análises químicas mostram que os AFR obtidos apresentavam formas mais arredondadas com menores teores de argamassa aderida (EVANGELISTA, 2014).

2.6.3. Propriedades dos betões, com agregados finos reciclados (BAFR), no estado fresco

Os AFR com origem em betão ou em resíduos da construção e demolição (RCD) possuem características distintas, que afetam também de forma distinta o betão com que são produzidos. Ou seja, a presença de AFR no BAFR altera as suas propriedades uma vez que estes agregados são mais angulosos e possuem maiores absorções de água (HANSEN, 1986). Em consequência disso, é de esperar que o teor de ar dos BAFR seja maior e que a sua massa volúmica desça. Vários autores determinaram que era necessário introduzir cerca de 15% mais de água na amassadura quando se utilizavam AFR (BUCK, 1977; HANSEN e NARUD, 1983; MALHOTRA, 1976). Contrariamente, LEITE (2001) teve ganhos de abaixamento com a introdução de AFR nas suas amassaduras e justificou o fenómeno com o facto de os AFR possuírem mais partículas finas, que facilitam a lubrificação do conjunto. FUMOTO e YAMADA (2002) necessitaram de aumentar a relação a/c de betões com AFR introduzidos secos, para obter a mesma trabalhabilidade de betões com os mesmos AFR, mas introduzidos saturados com superfície seca. CORINALDESI *et al.* (2002) produziram BAC com a inclusão de AFR e através de ensaios de espalhamento, de caixa de L e de resistência à segregação por coluna, constataram que as condições de trabalhabilidade são semelhantes, apesar da perda de resistência à compressão notada. BRITO e EVANGELISTA (2005) necessitaram de incrementar a relação a/c. SOLYMAN (2005) determinou o espalhamento de betões com AFR obtidos de centrais de reciclagem e obteve espalhamentos dentro do intervalo desejado. Em 2009, KOU e POON (2009) observaram que a utilização de agregados reciclados em condição não saturada na produção de BAC aumenta a trabalhabilidade destes nas idades iniciais, fruto da absorção de água dos agregados reciclados. PEREIRA *et al.* (2012) notaram uma perda de rendimento nos plastificantes que utilizaram nos BAFR, dando a entender que as cadeias poliméricas possuem maiores áreas de contacto com os AFR, comparativamente aos AFN. WANG (2012) concluiu, após análise reológica, que a presença de AFR nas pastas origina um rápido incremento da tensão de cedência, sendo tal justificado com a presença de cimento nos AFR que aceleram as reações hidráulicas.

2.7. Técnicas de avaliação do comportamento reológico no estado fresco

Os betões no estado fresco possuem características reológicas importantes (propriedades) que devem ser avaliadas com o intuito de serem obtidos betões com desempenhos cada vez mais satisfatórios. Isto proporcionou o desenvolvimento de novas técnicas e métodos de avaliação.

Uma correta avaliação do comportamento reológico de argamassas e betões envolve a determinação de, pelo menos, duas quantidades, sendo elas a viscosidade plástica e a tensão de cedência.

Dentro das técnicas de avaliação dos parâmetros reológicos, podem ser identificados ensaios empíricos e ensaios diretos, sendo os mais comuns:

1. Ensaio de espalhamento (Cone de Abrams) e Ensaio de fluidez (“Funil-V”) - Estes são ensaios empíricos os quais permitem de uma forma indireta proceder à avaliação do comportamento reológico;
2. Reómetros ou Viscómetros - Ensaios que permitem uma avaliação direta, através de análise de curvas de escoamento, dos parâmetros reológicos fundamentais.

No subcapítulo 2.7.1 é efetuada uma distinção dos dois tipos de equipamentos utilizados para realização de ensaios diretos, reómetros e viscosímetros. Para além disto são apresentados alguns tipos de reómetros existentes, e técnicas de ensaio a eles aplicáveis.

2.7.1. Ensaio direto - reómetros e viscosímetros

A diferença entre reómetros e viscosímetros está na maior capacidade de medição dos reómetros relativamente aos viscosímetros. Ambos conseguem gerar dados para análise de curvas de escoamento e de viscosidade, assim como “Loops” de tixotropia, e medições realizadas a uma taxa de corte constante. Além de avaliarem a trabalhabilidade, os reómetros também avaliam a viscoelasticidade, a fluência e efetuam medições de recuperação estrutural dos materiais (CASTRO *et al.*, 2009; KEALY, 2007b).

Os reómetros são equipamentos precisos não só para investigação, mas também para estudos práticos e medições de controlo de qualidade do material. Comparando com os testes empíricos tradicionais estes fornecem muito mais informação, e proporcionam uma redução no material utilizado e nas despesas em pessoal. Aliás, a informação obtida é mais objetiva, como o ensaio é totalmente automatizado e controlado por computador. Estes equipamentos foram desenvolvidos com o intuito de avaliar propriedades reológicas de fluídos e suspensões que nos permitem estudar o comportamento da tensão de cedência e da viscosidade plástica em função de outras variáveis, tais como o tempo, temperatura e pressão. Além disso, este equipamento apresenta geometrias que são especialmente adequadas para avaliação de misturas durante a fase de mistura e transporte, simulando condições de escoamento turbulento (CASTRO *et al.*, 2009; KEALY, 2007b).

Em termos de equipamentos existentes, podem encontrar-se diversos reómetros, todos eles capazes de avaliar propriedades reológicas do betão fresco, argamassas e pastas. De entre estes, sobressaem os reómetros BTRHEON (figura 2.34), BML (figura 2.35), ICAR (figuras 2.32 e 2.33) e o reómetro Viskomat NT ilustrado na figura 2.36.

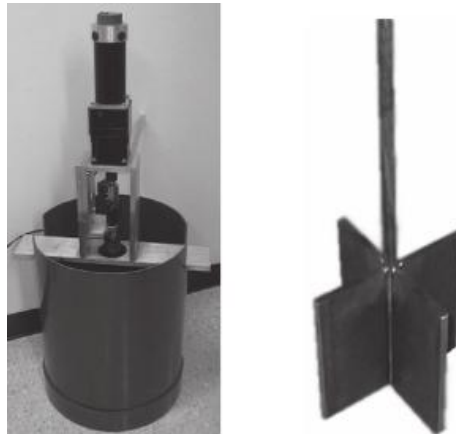


Figura 2.32 - Protótipo do reómetro ICAR e respetivas pás [AMZIANE *et al.*, 2006].

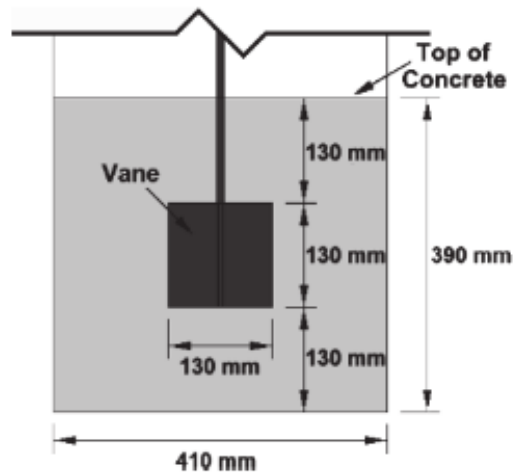


Figura 2.33 - Dimensões dos elementos do reómetro ICAR [AMZIANE *et al.*, 2006].



Figura 2.34 - Reómetro BTRHEOM [AMZIANE *et al.*, 2006].



Figura 2.35 - Reómetro BML [BARTOS, 1998].



Figura 2.36 - Reómetro Viskomat NT.

Contudo, os ensaios referentes aos diversos equipamentos não se baseiam nos mesmos princípios de medição. A existência de uma ampla variedade de reômetros pode ter um efeito negativo a nível do tratamento de resultados dos ensaios, pois reduz a confiança nos resultados dos testes efetuados e aumenta a dificuldade de comparação entre resultados de diferentes reômetros (AMZIANE *et al.*, 2006; NEPOMUCENO, 2005).

Por exemplo, o reômetro BTRHEOM, desenvolvido pelo LCPC, e ilustrado na figura 2.34, efetua a medição das tensões que são necessárias para a deformação de uma amostra de betão acontecer. Da informação das tensões obtidas e o número de revoluções é possível derivar uma curva de escoamento através de uma análise de regressão (REINHARDT e WÜSTHOLZ, 2006).

Por sua vez, o reômetro ICAR (figura 2.32), é um equipamento portátil de baixo custo que pode proceder a medições em misturas de betão que variam em trabalhabilidade desde aproximadamente 50 mm de espalhamento até betões auto-compactáveis. É um equipamento que tem o potencial para efetuar medições de curvas de escoamento, executar testes de tensões crescentes para tensões de cedência, e ainda caracterizar a tixotropia (AMZIANE *et al.*, 2006).

Dentro da categoria dos ensaios diretos, tanto nos reômetros como viscosímetros podem ser aplicadas técnicas mais específicas para avaliação dos parâmetros reológicos (figuras 2.39 e 2.40). Estas técnicas, ora aplicadas através de velocidades controladas (aplicam-se taxas de corte para medir tensões de corte) ora de tensões controladas (aplicadas tensões de corte para medição da velocidade de corte resultante), efetuam-se utilizando ensaios de perfil rampa e ensaios de perfil step (KEALY, 2007a). Destes dois tipos de ensaio, podem ser obtidas curvas de escoamento e de viscosidade, similares às apresentadas nas figuras 2.37 e 2.38. Os dois tipos de ensaios serão descritos nos próximos subtópicos e serão também apresentadas as vantagens e desvantagens relativas a cada um deles.

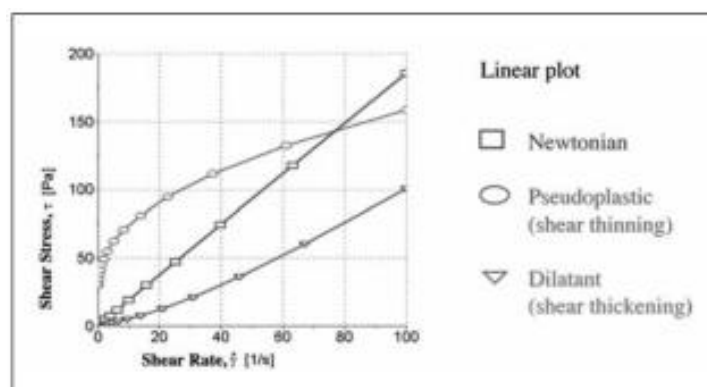


Figura 2.37 - Curvas de escoamento para diferentes tipos de materiais [KEALY, 2007a].

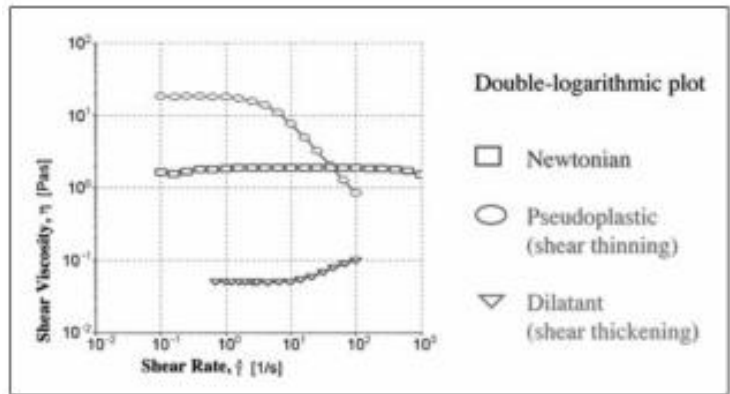


Figura 2.38 - Curvas de viscosidade para diferentes tipos de materiais [KEALY, 2007a].

2.7.1.1. Técnica de medição do perfil rampa

Num ensaio com perfil rampa (figura 2.39) observa-se uma leve transição incremental de uma determinada velocidade de corte até à seguinte velocidade. Pode verificar-se durante o ensaio uma contínua variabilidade da velocidade de corte, entre a mais baixa designada para o ensaio e a maior seguinte. Quanto à taxa de variação da velocidade de corte, esta é definida pelo utilizador, e o número de pontos de dados é normalmente elevado, formando-se uma curva contínua entre a velocidade de corte mais alta e a baixa, seleccionada (KEALY, 2007a).

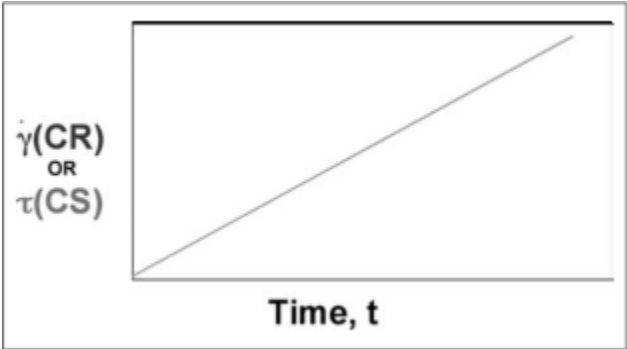


Figura 2.39 - Imagem gráfica de dados tipo introduzidos num perfil rampa [KEALY, 2007a].

2.7.1.1.1. Vantagens e desvantagens do perfil rampa

A técnica de perfil rampa como todo o tipo de métodos apresenta vantagens e desvantagens (KEALY, 2007a) durante a sua aplicação. Como pontos fortes este tipo de ensaio apresenta:

- Fornecimento de um quadro completo de como o material se comporta entre os limites de ensaio estipulados;
- Alerta precoce de problemas com a técnica ou medição, onde o utilizador possuindo os dados completos das tensões de corte lhe é permitido investigar determinados problemas, como o fluxo caótico no espaçamento vazio de medição e o escorregamento nas paredes geométricas de medição;
- Interpretação intuitiva dos dados, devido ao seu significado ser de fácil entendimento e aplicação uma vez que o processo apropriado das tensões e velocidades de corte é conhecido;
- Simples processo de medição e análise.

Já em termos de desvantagens, o método rampa pode exibir os potenciais problemas:

- Dimensão da fração sólida, em lamas ou pastas, similar ao do espaço fora do limite de medição, pode originar “pontes” e causar elevadas tensões de corte artificiais;
- Sensor de inércia, particularmente os cilindros concêntricos e cones de grande diâmetro ou pratos podem atingir um peso elevado, fazendo com que durante a variação da taxa de rotação no ensaio rampa os sensores acelerem a uma velocidade superior à prevista pelo Software de Controlo, e conseqüentemente afetem a velocidade de corte nos materiais, incrementando-a face ao valor imposto pelo controlador;
- Tempo considerável das medições, pela potencial inércia, e alcance alargado da taxa de corte do ensaio;
- Controlo de temperatura, pois a elevadas velocidades de corte o calor de deformação torna-se elevado, com a ocorrência de fricção interna entre os fluxos laminares movendo-se uns sobre os outros;
- Segregação do material provoca a perda da qualidade desejada dos resultados quando os ensaios são considerados longos;
- Fluxo caótico pode surgir a elevadas taxas de corte, onde estas transformam o regime de escoamento laminar existente no espaço fora do limite de medição, em regime turbulento;
- Escorregamento de pastas e lamas de construção, onde estas se “colam” às paredes da geometria de medição;

- Materiais dependentes do tempo (tixotrópicos) exigem procedimentos adequados do manuseamento da amostra e do ensaio, pois é crucial para medições repetitivas, e neste tipo de materiais os resultados são apenas relativos (dependem da técnica usada para os gerar).

2.7.1.2. Técnica de medição do perfil step

Esta é uma técnica de ensaio que envolve a transição de uma velocidade de corte para a seguinte através de uma mudança discreta de passos. Num ensaio step, durante um determinado período, antes duma mudança abrupta para uma nova velocidade de corte, a velocidade é constante (figura 2.40). O número de passos que descrevem o ensaio, e a velocidade de corte são parâmetros inseridos pelo utilizador, conforme o estudo que se pretende efetuar. Também se pode afirmar, que neste tipo de ensaio o número de dados é normalmente muito inferior aos existentes num perfil rampa, aparecendo pontos singulares entre os níveis da velocidade (pode normalmente fazer-se uma interpolação através de uma leve curva) de corte inferior e superior, selecionada (KEALY, 2007a).

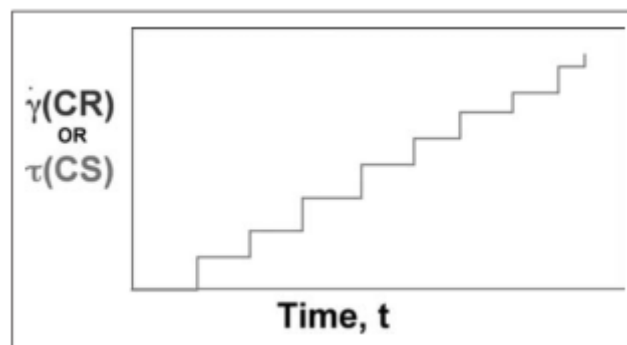


Figura 2.40 - Imagem gráfica de dados tipo introduzidos num perfil step [KEALY, 2007a].

2.7.1.2.1. Vantagens e desvantagens do perfil step

Como se irá verificar, na lista de vantagens e desvantagens do perfil step, existem alguns pontos já apontados como fortes ou fracos no perfil rampa. Assim, destes pontos reincidentes não será efetuada descrição, apenas uma indicação.

Tendo em conta o que aqui concerne, apresentam-se os pontos vantajosos do perfil step, que são:

- Sensor de inércia, em que o utilizador tem tempo para ajustar a velocidade de rotação para que seja exatamente como a especificada, visto as taxas de deformação não variarem durante cada passo do ensaio, fazendo com que o perfil step seja mais preciso do que o perfil rampa neste aspeto;
- Interpretação intuitiva dos resultados;
- Rápido tempo de medição, onde uma taxa de corte pode ser definida pelo utilizador e aplicada no ensaio para apenas alguns segundos, em comparação com o perfil rampa;
- Estável taxa de deformação, podendo os testes serem escolhidos para lidar melhor com o calor do escoamento;
- Simples processo de medição e análise.

Por sua vez, também existem potenciais problemas com o método:

- Dimensão da fração sólida;
- Aviso prévio de problemas com a técnica ou medição, onde o utilizador possuindo os dados completos de uma gama de taxas de corte pode fazer uma análise à segregação, ao fluxo caótico fora da zona limite de medição e ao deslizamento na parede da geometria de medição, porém no perfil step pode não ser revelada toda a informação, especialmente se forem tomados apenas alguns pontos;
- Controlo de temperatura;
- Segregação dos materiais;
- Fluxo caótico fora da zona limite de medição;
- Escorregamento nas paredes da geometria de medição;
- Procedimento adequado de manuseamento e de técnicas de ensaio para materiais dependentes do tempo (tixotrópicos).

2.8. Conclusões

A produção de betão envolve a utilização de diversos tipos de materiais. Atualmente existe uma constante integração de diferentes materiais na composição dos betões, tais como os agregados finos reciclados, na tentativa de efetuar melhoramentos nas suas características.

O betão auto-compactável surgiu com a necessidade de se possuir um betão que apresentasse maior homogeneidade, associado a uma melhoria na durabilidade das estruturas,

independentemente da qualidade dos trabalhos de compactação em obra. O betão auto-compactável define-se como uma suspensão concentrada onde os sólidos estão dispersos numa fase aquosa fluida.

Comparativamente ao betão convencional, as propriedades do BAC estão associadas à sua auto-compactabilidade. Em termos mecânicos esta propriedade está relacionada com a reologia do betão fresco, enquanto em termos de manuseamento na prática está relacionada com os parâmetros de trabalhabilidade.

A trabalhabilidade pode ser genericamente definida como a maior ou menor facilidade com que o betão é manuseado, e a maior ou menor facilidade com que este preenche todos os espaços da cofragem pela ação do seu próprio peso, conservando a sua estabilidade e uma qualidade uniforme sem defeitos. A reologia, por sua vez, pode definir-se como a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria, e lida com relações entre tensão, deformação e tempo.

Para quantificar a reologia, existem ensaios empíricos indiretos e ensaios diretos. Da lista de ensaios empíricos constata-se o ensaio de espalhamento do cone e o ensaio de escoamento do Funil-V, de onde podem ser obtidas respostas em termos de diâmetro de espalhamento e de tempos de escoamento das argamassas, respetivamente. Como ensaios diretos existem os reómetros, os quais automaticamente geram conjuntos de valores que permitem posteriormente a obtenção de curvas de escoamento, através de modelos reológicos.

Os diversos modelos reológicos, criados por vários autores, podem descrever-se, basicamente, como sendo as curvas geradas partindo da informação introduzida nos viscosímetros ou reómetros, e são um auxílio na descrição das formas dos diferentes tipos de curvas de escoamento. Entre eles podemos encontrar modelos mais simples como o modelo de Newton, passando pelos modelos de Ostwald-de-Waele e o modelo de Bingham, até a um modelo mais complexo envolvendo maior número de parâmetros, designado por modelo de Herschel-Bulkley.

Em termos de composição, o BAC assemelha-se ao betão corrente, sendo composto basicamente pelos materiais finos, adjuvantes, agregados e água, no entanto, no BAC podem ser utilizadas adições para incrementar e manter a coesão e resistência à segregação do betão. Essas alterações quando efetuadas nas misturas têm influência ao nível dos parâmetros reológicos tensão de cedência e viscosidade plástica. Quando são efetuadas alterações de aumento ao nível da concentração de cimento, da finura de areia, do tempo ou da adição de agregados finos reciclados, registam-se também aumentos ao nível destes dois parâmetros reológicos. Para além destes dois parâmetros importantes, tensão de cedência e viscosidade plástica, existe um terceiro parâmetro reológico designado por tixotropia.

A tixotropia pode ser considerada como a capacidade que um material possui para ir de um estado estrutural para outro e readquirir o estado inicial durante um determinado período de tempo. A medição da tixotropia de um material em termos fundamentais e absolutos é uma tarefa muito difícil de efetuar. Um dos métodos mais frequentemente utilizado é o de aplicar diferentes velocidades de corte, mas constantes, e fazer a medição da deformação estrutural com o tempo. Outro método é o teste “Loop” que consiste na aplicação ao material de uma contínua e crescente velocidade de corte, e novamente uma contínua velocidade de corte até atingir o valor zero.

Foi referido no início deste subcapítulo que os agregados finos reciclados podem ser adicionados ao BAC numa tentativa de melhoramento das características do mesmo. Os agregados finos reciclados surgem normalmente da trituração dos resíduos de construção e demolição como um subproduto não desejado, uma vez que contém contaminantes. Se esses mesmos contaminantes forem separados na origem dos RCD, os agregados podem vir a ser utilizados. A utilização de agregados reciclados depende das regras e procedimentos estabelecidos para o seu uso e depende de país para país. Têm sido implementadas novas especificações ou adendas que estabelecem os limites de utilização e os critérios de aceitação para o uso em betões. No caso de Portugal, o uso de AFR é ainda proibido, seja qual for a sua natureza ou destino a dar ao betão.

Capítulo 3 - Programa Experimental

3.1. Introdução

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados na parte experimental do trabalho. Para além disto, são também apresentados todos os procedimentos adotados nos diferentes tipos de ensaios realizados.

De referir, que tanto os materiais escolhidos, assim como os ensaios efetuados, tiveram por base normas e regulamentação vigente, para que determinados fatores que pudessem interferir no estudo de forma nociva, fossem eliminados. A consideração desta documentação implica a obtenção de resultados mais credíveis e gera maior confiabilidade no momento em que partimos para a interpretação dos resultados da investigação.

Os ensaios para este trabalho foram realizados no Laboratório de Tecnologia e Ensaios Mecânicos do DECA da Universidade da Beira Interior (UBI).

3.2. Descrição dos materiais utilizados

No presente subcapítulo, os materiais intervenientes nos ensaios experimentais foram subdivididos em subtópicos, sendo eles os seguintes: Materiais finos (Ligante e Adições), Adjuvante, Agregados finos e Água de amassadura.

É preciso mencionar que PINTO (2011) descreveu, de forma mais aprofundada, os diferentes tipos de materiais normalmente utilizados na produção de betões auto-compactáveis. Por essa razão, nesta dissertação, a descrição dos materiais será efetuada de uma forma ligeira.

3.2.1. Materiais finos

3.2.1.1. Ligante

No trabalho laboratorial, a escolha do tipo de produto ligante para argamassas recaiu no Cimento Portland Normal, mais especificamente CEM I 42,5R, sendo que todas as

características técnicas, onde estão incluídas a análise química, ensaios mecânicos e físicos, foram cedidas pelo fabricante (SECIL).

Contudo, PINTO (2011) teve a necessidade de determinar em laboratório a massa específica deste material, baseando-se na especificação LNEC E64 (1960).

Para proceder ao doseamento das misturas neste estudo, optou-se, para cálculo das mesmas, em utilizar os valores anteriormente determinados por PINTO (2011).

Em termos de acondicionamento, este material encontrava-se selado em bidão plástico, no interior do laboratório, em ambiente fresco e seco.

3.2.1.2. Adições

Para a obtenção de dois tipos de misturas particulares, houve a necessidade de serem incluídas dois tipos de adições minerais, fíler calcário e cinza volante. Estas adições possuem diferentes características, logo são classificadas de formas distintas. O fíler calcário, por exemplo, é um material quase inerte sendo-lhe atribuído o tipo I, enquanto a cinza volante é um material pozolânico ou hidráulico latente, classificado do tipo II.

Quanto ao fíler calcário, também designado comercialmente por *Betocarb P1-OU*, foi cedido pela empresa *OMYA COMITAL - Minerais e Especialidades, S.A.*. Este material é constituído essencialmente por carbonato de cálcio oolítico, e apresenta-se sob a forma de um pó branco. De apontar, que além do material a empresa facultou também a respetiva ficha técnica. Apesar disto, como já tinha sucedido com o cimento, PINTO (2011) também se viu na obrigação de obter os valores da massa específica. Baseando-se na especificação LNEC E64 (1960), determinou essa propriedade do material no laboratório.



Figura 3.1 - Imagem da zona de carga da fábrica da OMYA COMITAL em Soure [NEPOMUCENO, 2005].

Por sua vez, as cinzas volantes foram fornecidas pela empresa *Betão, Liz* situada no Concelho da Covilhã. Essas cinzas tiveram origem na Central Termoelétrica do Pego (Concelho de Abrantes), e são constituídas basicamente por partículas esféricas e vítreas, apresentando-se em forma de um pó fino. É um material principalmente composto por Sílica (SiO_2) e Óxido de alumínio (Al_2O_3). A empresa aquando do fornecimento do material forneceu também os respetivos resultados dos ensaios físicos e químicos.

Ambos os tipos de adições, aqui abordados, encontravam-se em condições de acondicionamento semelhantes à do Cimento.

Como nota, é de apontar que os valores das massas específicas destas duas adições minerais, determinados por PINTO (2011), foram utilizados no cálculo da dosagem das argamassas, neste trabalho.

3.2.2. Adjuvante

O tipo de adjuvante adotado para as argamassas foi um superplastificante de última geração denominado comercialmente de Sika® ViscoCrete® 3005, e fornecido pela empresa *SIKA Portugal S.A.*. Este é um produto específico para a produção de BAC, sendo um forte redutor de água para betões. É de referir que a ficha técnica foi fornecida conjuntamente com o produto.

Em termos de características é um produto que se apresenta na forma de um líquido castanho claro, levemente turvo, sendo quimicamente composto essencialmente por carboxilatos modificados. A sua constituição leva a que este tenha uma massa volúmica um pouco superior à da água, cerca de $1,05 \text{ Kg/dm}^3$. O produto fornecido em bidões plásticos de 5L, deve ser armazenado, para boa conservação, em local seco e ao abrigo da luz solar direta (SIKA, 2011).

3.2.3. Agregados

Para o estudo em questão houve a necessidade de produção de argamassas com materiais finos, representativas dos BAC. Assim, os agregados finos escolhidos foram divididos em duas classes, sendo elas os Agregados Finos Naturais e os Agregados Finos Recicladados.

Para os agregados finos naturais, optou-se por utilizar dois tipos de areias, as quais foram apelidadas neste estudo por Areia 0/2 e Areia 0/4 (figura 3.2). Estes agregados finos naturais, areia 0/2 e areia 0/4 podem ser caracterizados, respetivamente:

- Areia 0/2: Uma areia natural rolada de grão fino proveniente da Figueira da Foz, constituída essencialmente por grãos de areia de pequena dimensão de quartzo, feldspato e micas.
- Areia 0/4: Uma areia natural rolada de grão intermédio proveniente de Abrantes (origem fluvial). Nesta, encontram-se grãos de maior dimensão basicamente constituídos por quartzo, existindo também fragmentos rolados de xisto e grãos rolados de quartzito. Por sua vez, os grãos de menor dimensão são constituídos por quartzo, feldspato e micas.

De referir que estes agregados finos naturais foram ambos cedidos pela empresa *Betão Liz*, localizada no Concelho da Covilhã.

Relativamente aos agregados finos reciclados, designados no trabalho por Areia reciclada (figura 3.2), tiveram origem na britagem de antigos provetes de betão. Constituem-se por agregados com dimensão inferior a 5 mm.

Em termos de acondicionamento, tanto os agregados finos naturais como os reciclados encontravam-se em bidões plásticos fechados. A Areia 0/2 natural e a Areia reciclada encontravam-se no interior do Laboratório de Tecnologia e Ensaios Mecânicos do DECA da UBI, em local fresco e ao abrigo da exposição solar. Porém, a Areia 0/4 natural encontrava-se no exterior exposta à luz solar, e sendo o estudo efetuado durante o mês de Julho, com elevadas temperaturas verificadas no exterior, isto poderia levar a variações rápidas (perdas) nas percentagens de teor de água superficiais dos respetivos agregados, originando pequenos erros no momento da determinação das dosagens de argamassa.

É de notar que a opção por este tipo de agregados finos reciclados foi resultado dos estudos elaborados por PINTO (2011). No seu estudo, o autor procedeu à introdução da fração mais fina (agregados de dimensão inferior a 5 mm, com inclusão de parcela significativa de materiais finos) resultante da britagem de betões, para fazer uma avaliação do impacto da incorporação de agregados finos reciclados nas propriedades do BAC.

Para o atual trabalho, um dos principais objetivos foi o de elaborar uma avaliação do impacto da introdução da parcela fina dos agregados reciclados no BAC, mas no aspeto da componente reológica.



Figura 3.2 - Tipos de areias utilizadas. Da esquerda para a direita: Areia reciclada, Areia natural 0/4 e Areia natural 0/2.

De acordo com as respectivas normas e especificações, houve necessidade de proceder à determinação, através de alguns ensaios, de algumas propriedades para vias de correção da dosagem dos materiais das argamassas:

- Análise granulométrica: realizada de acordo com os procedimentos indicados na especificação EN 933-1 (2012).
- Determinação do teor de água por secagem em estufa ventilada: colocado em prática tendo por base a norma portuguesa NP EN 1097-5 (2011).
- Determinação da massa volúmica dos agregados saturados de água e com a superfície seca: esta propriedade foi determinada através do ensaio do Picnómetro de Hélio, o qual não tem especificação associada. Fazendo uma descrição do ensaio, numa primeira fase as amostras foram sujeitas à remoção da humidade superficial, com base na norma NP EN 1097-5 (2011). Depois de levado o sistema à pressão atmosférica, isolou-se a câmara de expansão, fechando a respetiva válvula e pressurizando a câmara que continha a amostra até uma pressão P_1 (cerca de 17 psig). Seguidamente abriu-se a válvula de expansão, originando uma variação na pressão, para P_2 . Admitindo comportamento ideal do hélio, o volume do sólido pode calcular-se a partir da seguinte equação (FIGUEIREDO e MOURA, 2002):

$$P_1 \times (Va - Vs) = P_2 \times (Va - Vs + Ve) \quad (3.1)$$

Donde:

$$Vs = Va - \frac{Ve}{\left(\frac{P_1}{P_2}\right) - 1} \quad (3.2)$$

Em que:

Va - Volume da câmara da amostra do Picnómetro de Hélio;

Ve - Volume da câmara de expansão do Picnómetro de Hélio;

Vs - Volume do sólido.

A massa volúmica foi automaticamente calculada pelo aparelho, através da relação entre a massa do sólido (introduzida como dado de entrada) e o volume calculado da equação (3.2).

3.2.4. Água de amassadura

A qualidade da água de amassadura para o fabrico de betão pode influenciar os tempos de presa, o desenvolvimento da resistência do betão e a proteção da armadura contra a corrosão. Assim, e tendo em conta a recomendação da norma NP EN 1008 (2003), optou-se por utilizar água da rede pública de abastecimento, nas misturas a produzir.

3.3. Misturas de materiais finos

No desenvolvimento deste trabalho foi necessário produzir dois tipos (séries) distintos de argamassas. Para diferenciação das misturas de materiais finos atribuiu-se designações a cada uma delas, designou-se uma por mistura binária, correspondente a uma Série 1 e uma mistura ternária, associada a uma Série 2. Em ambas as argamassas produzidas utilizou-se o cimento Portland CEM I 42,5R e uma adição de fíler calcário (adição quase inerte). No entanto, para uma das misturas, incluiu-se para além destes dois constituintes uma outra adição, cinzas volantes (adição pozolânica ou hidráulica latente), fazendo desta uma argamassa dita ternária. Em termos de número, produziram-se 11 argamassas para cada uma das séries, perfazendo um total de 22 misturas. Convém referir que a primeira argamassa de cada uma das séries não conteve agregados finos reciclados, constituindo argamassas de referência (2 no total), para efeitos de comparação com as remanescentes argamassas das respetivas séries. As restantes 20 argamassas (10 para cada série) foram sujeitas a um incremento percentual sucessivo de agregados finos reciclados em detrimento de agregados finos naturais. No entanto, destas 10 misturas produzidas para cada série, 5 contiveram na composição um volume de água e de superplastificante original iguais ao do respetivo volume da argamassa de referência. As restantes 5 misturas obedeceram aos valores corrigidos de

volume de água e de superplastificante. Nos pontos 3.3.1. e 3.3.2. descreveram-se mais especificamente, as misturas binárias e ternárias, respetivamente.

3.3.1. Misturas binárias de materiais finos

A mistura binária de materiais finos, também designada neste trabalho como Série 1, foi produzida efetuando a substituição da parcela dos AFN por AFR até cerca de metade da percentagem total de agregados (50%). Esta substituição do agregado, mais precisamente da Areia 0/4 por Areia reciclada, fez-se em passos 10 percentuais. Produziu-se uma primeira argamassa sem incluir agregados reciclados (mistura de referência), com duas componentes finas, sendo elas o cimento Portland CEM I 42,5R e o fíler calcário, constando do seu volume absoluto total 40% e 60%, respetivamente. Desta série produziram-se 11 argamassas (referência inclusive), porém nas restantes 10 houve uma repetição em termos da composição e das percentagens do material fino. Em 5 das argamassas, a única diferença que houve na sua preparação foi a inclusão dos valores de volume de água e de superplastificante corrigidos, ao contrário das 5 outras misturas que possuíram os valores originais de água e superplastificante (iguais aos valores registados na argamassa de referência). A escolha das argamassas descritas recaiu na intenção de avaliar parâmetros reológicos, como verificar alterações na viscosidade das argamassas, consoante as alterações introduzidas nas respetivas misturas.

Em relação à granulometria dos agregados finos, a substituição da Areia 0/4 nas diferentes argamassas produzidas não levou a uma transformação significativa nas curvas reais, verificando-se uma homogenia em todas as misturas da série.

Na tabela 3.1 podem observar-se os tipos de materiais finos e respetivas percentagens, utilizados na produção das diferentes argamassas da Série 1. Como exemplo, a amostra nº 2, denominada “Amostra2.FC.0,80” indica na composição 40C1+60FC+10AFR. Isto significa que a argamassa na sua constituição possui em termos de volume absoluto 40% de cimento Portland CEM I 42,5R (40C1), 60% de fíler calcário (60FC) e 10% de agregados finos reciclados (10AFR), neste caso areia reciclada, por substituição de Areia 0/4 natural.

Tabela 3.1 - Associações binárias de argamassa de materiais finos (Série 1).

Materiais ►	Materiais finos			Agregados finos		
	Cimento	Adição Tipo I	Adição Tipo II	Areia 0/2	Areia 0/4	Areia reciclada
	CEMI 42,5R (C1)	Filer Calcário (FC)	Cinzas Volantes (CV)	(a1)	(a2)	(a3)
Misturas ▼	$\delta c1=3140 \text{ kg/m}^3$	$\delta fc=2720 \text{ kg/m}^3$	$\delta cv=2380 \text{ kg/m}^3$	$\delta s1=2661 \text{ kg/m}^3$	$\delta s2=2647 \text{ kg/m}^3$	$\delta s3=2310 \text{ kg/m}^3$
Identificação das Misturas Binárias e Percentagens da Composição das Argamassas	1 Amostra1.FC.0,80 40C1+60FC	40%	60%	---	50%	50%
	2 Amostra2.FC.0,80 40C1+60FC+10AFR	40%	60%	---	50%	40%
	3 Amostra3.FC.0,80 40C1+60FC+20AFR	40%	60%	---	50%	30%
	4 Amostra4.FC.0,80 40C1+60FC+30AFR	40%	60%	---	50%	20%
	5 Amostra5.FC.0,80 40C1+60FC+40AFR	40%	60%	---	50%	10%
	6 Amostra6.FC.0,80 40C1+60FC+50AFR	40%	60%	---	50%	---

3.3.2. Misturas ternárias de materiais finos

Uma segunda série de argamassas foi reformulada a partir da mistura de referência da argamassa binária. Esta decisão teve como base verificações efetuadas por NEPOMUCENO (2005) ao imergir diretamente agregados finos reciclados, sem exclusão da parcela fina, em água, registando elevados níveis de hidróxido de cálcio. Tentando tirar partido deste fator decidiu aliar à mistura uma pozolana, designada cinza volante. Essencialmente o que aconteceu foi que, na mistura de referência binária, alterou-se a quantidade de filer calcário de 60% para 50%, compensando essa redução de 10% com a inclusão duma mesma quantidade de cinzas volantes. A mistura agora obtida (Série 2) combinando três componentes distintos de material fino, levou à atribuição do título de mistura ternária. Para produzir as 11 argamassas ternárias exigidas para o estudo, com base numa argamassa de referência, foi efetuada a substituição do AFN por AFR em percentagens crescentes até atingir 50% de areia reciclada. Essa substituição foi feita em passos de 10%. Desta forma criaram-se 10 argamassas incluindo agregado reciclado e uma mistura de referência extra sem AFR. Convém referir que da totalidade das misturas ternárias com agregado reciclado, 5 contiveram na sua composição volume de água e de superplastificante original, ou seja, iguais ao do volume registado na mistura de referência. Nas restantes 5 misturas ternárias aplicou-se os volumes de água e de superplastificante corrigidos.

Em todas as argamassas de agregados finos da Série 2, a substituição do agregado natural por agregado reciclado não afetou a curva real granulométrica, mantendo-se esta praticamente inalterada.

São apresentadas na tabela 3.2 as misturas ternárias (Série 2) e respectivas composições em termos de dosagem de materiais sólidos finos. Pode ser observada, por exemplo, na mistura nº 3 identificada como “Amostra3.FCCV.0,80”, a sigla 40C1+50FC+10CV+20AFR. Traduzindo, esta é uma argamassa que incorpora no seu esqueleto um volume absoluto de 40% de cimento Portland CEM I 42,5R (40C1), uma quantidade de 50% de fíler calcário (50FC), 10% de cinza volante pozolânica (10CV), e ainda uma quantia de 20% de agregado fino reciclado (20AFR) imposta pela substituição da Areia natural 0/4 por Areia reciclada.

Tabela 3.2 - Associações ternárias de argamassa de materiais finos (Série 2).

	Materiais ►	Materiais finos			Agregados finos		
		Cimento	Adição Tipo I	Adição Tipo II	Areia 0/2	Areia 0/4	Areia reciclada
		CEM I 42,5R (C1)	Fíler Calcário (FC)	Cinzas Volantes (CV)	(a1)	(a2)	(a3)
	Misturas ▼	$\delta c1=3140 \text{ kg/m}^3$	$\delta fc=2720 \text{ kg/m}^3$	$\delta cv=2380 \text{ kg/m}^3$	$\delta s1=2661 \text{ kg/m}^3$	$\delta s2=2647 \text{ kg/m}^3$	$\delta s3=2310 \text{ kg/m}^3$
Identificação das Misturas Ternárias e Percentagens da Composição das Argamassas	1 Amostra1.FCCV.0,80 40C1+50FC+10CV	40%	50%	10%	50%	50%	---
	2 Amostra2.FCCV.0,80 40C1+50FC+10CV+10AFR	40%	50%	10%	50%	40%	10%
	3 Amostra3.FCCV.0,80 40C1+50FC+10CV+20AFR	40%	50%	10%	50%	30%	20%
	4 Amostra4.FCCV.0,80 40C1+50FC+10CV+30AFR	40%	50%	10%	50%	20%	30%
	5 Amostra5.FCCV.0,80 40C1+50FC+10CV+40AFR	40%	50%	10%	50%	10%	40%
	6 Amostra6.FCCV.0,80 40C1+50FC+10CV+50AFR	40%	50%	10%	50%	---	50%

3.4. Caracterização da granulometria dos agregados finos

Tendo em conta o estudo que se pretendia efetuar, da reologia da fase argamassa do BAC, com substituição de agregados finos naturais por agregados finos reciclados, houve necessidade de definir uma granulometria dos agregados finos para as distintas misturas de materiais a produzir. Esta seleção granulométrica teve como finalidade a obtenção de um mínimo de vazios nas misturas, adquirindo uma compacidade máxima, com vantagens em termos do índice de atrito entre partículas devido ao maior afastamento entre elas. Para

além disto, pode ainda dizer-se que era pretendida uma similar estrutura granular e volume em todas as argamassas, sabendo de início que essas argamassas iriam conter diferentes proporções de agregados finos conforme fossem sendo adicionados os agregados reciclados. A caracterização da análise granulométrica neste estudo foi realizada com recurso a peneiros da norma ISO 3310 (diferentes dos utilizados por PINTO (2011) e NEPOMUCENO (2005), nos respetivos trabalhos) através do equipamento ilustrado na figura 3.4. PINTO (2011), baseando-se na proposta de NEPOMUCENO (2005), estimou a melhor proporção das Areias 0/2 e 0/4, para obtenção de uma curva granulométrica real, o mais próxima possível da curva de referência dos agregados finos (figura 3.3), baseada na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Curva de referência dos agregados finos proposta por NEPOMUCENO (2005).

Peneiro	Malha [mm]	Areia 01	Areia 05	Mistura (Curva de Referência)
		a ₁	a ₂	
		0,40	0,60	
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
¾ □	19,10	100,00	100,00	100,00
(*) ½ □	12,70	100,00	100,00	100,00
⅓ □	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 ▶		1,494	2,705	2,220

(*) Série secundária
Peneiros para o cálculo do módulo de finura

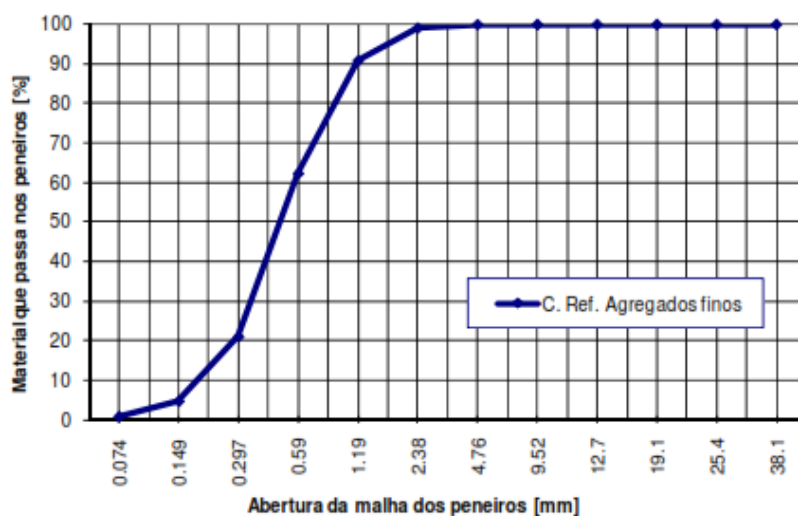


Figura 3.3 - Curva de referência dos agregados finos, baseada na tabela 3.3 [NEPOMUCENO, 2005].

Como verificou uma similaridade entre as curvas granulométricas da Areia 0/4 e dos agregados finos reciclados, PINTO (2011) decidiu fazer uma substituição diretamente proporcional, em percentagem crescente, da Areia 0/4 por agregados finos reciclados (Areia reciclada).

Tendo este estudo base no trabalho de PINTO (2011), foi adequado utilizar o mesmo tipo de agregados (com dimensões semelhantes), e seguir a mesma metodologia.



Figura 3.4 - Imagem do equipamento de peneiração mecânica utilizado.

3.5. Método de cálculo para obtenção de argamassas

Para a obtenção de argamassas de qualidade, em laboratório, foi necessária a criação de métodos auxiliares de cálculo. Devido ao tipo de estudo a realizar neste trabalho, os métodos utilizados foram os propostos por NEPOMUCENO (2005), que se apresentam no subcapítulo 3.5.1.

3.5.1. Folha de cálculo Excel

O facto de ser necessária a produção de múltiplas argamassas, de diferentes composições, e de efetuar os respetivos cálculos rapidamente em laboratório, para estudo, conduziu

NEPOMUCENO (2005) a desenvolver um método facultativo que se traduziu numa folha de cálculo (EXCEL). No entanto, para este trabalho efetuaram-se adaptações na folha de cálculo. Uma delas baseava-se no interesse de apenas querer incorporar três tipos de agregados finos (Areia 0/2, Areia 0/4 e Areia reciclada). Para além desta modificação, procedeu-se a um ajustamento para incorporação automática de dosagens de água e de agregados finos em função do teor de água superficial, medidos imediatamente antes de cada amassadura, assim como já tinha efetuado PINTO (2011), isto porque quando utilizados os agregados finos se encontravam saturados de água, por forma a não se sentir demasiada dificuldade na avaliação dos resultados reológicos das argamassas, principalmente devido à elevada absorção de água dos agregados finos reciclados. Por fim, uma terceira alteração foi efetuada, em resposta à utilização de peneiros com diferentes aberturas de malha (norma ISO 3310), comparativamente aos trabalhos de PINTO (2011) e NEPOMUCENO (2005), na fase da análise granulométrica.

Na tabela 3.4 pode-se observar um exemplo da folha de cálculo adaptada. Pode ser identificada, neste exemplo específico, através de uma simples leitura, a resposta dada pela folha de cálculo à introdução de valores como as percentagens de agregados finos ($a_1= 0,50$; $a_2= 0,30$; $a_3= 0,20$), a percentagem de cimento ($f_{c1}= 0,40$), as percentagens de adições ($f_{cv}= 0,10$; $f_{fc}= 0,50$) e as diferentes relações água/finos, finos/agregados finos e superplastificante/finos ($V_w/V_p= 0,740$; $V_p/V_s= 0,800$; $S_p/P\%= 0,385$). Encontram-se indicados, a cor azul, os dados que foram introduzidos na folha.

Tabela 3.4 - Folha de cálculo EXCEL para argamassas, adaptada, proposta por Nepomuceno.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS																																																																											
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos			Data																																																																						
Amostra3.FCCV.0,80		40C1+50FC+10CV+20ARCF			11-07-2014																																																																						
Parâmetros da composição																																																																											
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%																																																																									
0,800	0,740	0,385																																																																									
Composição da mistura de finos																																																																											
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg																																																																						
0,40	0,00	0,10	0,00	0,50	0,00																																																																						
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³																																																																											
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg																																																																						
3140	3040	2380	2170	2720	2650																																																																						
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³																																																																											
δs1	δs2	δs3	---	---																																																																							
2861	2647	2310	---	---																																																																							
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³																																																																											
δsp	---	---	---	---																																																																							
1050	---	---	---	---																																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Abertura da malha (mm)</th> <th>Areia 0/2 a1</th> <th>Areia 0/4 a2</th> <th>Areia R a3</th> <th>Mistura (Curva Real)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">0,50</td> <td style="text-align: center;">0,30</td> <td style="text-align: center;">0,20</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Percentagem de passados</td> </tr> <tr> <td>8,000</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> </tr> <tr> <td>4,000</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">99,15</td> <td style="text-align: center;">99,91</td> <td style="text-align: center;">99,73</td> </tr> <tr> <td>2,000</td> <td style="text-align: center;">99,96</td> <td style="text-align: center;">92,78</td> <td style="text-align: center;">81,92</td> <td style="text-align: center;">94,20</td> </tr> <tr> <td>1,000</td> <td style="text-align: center;">99,00</td> <td style="text-align: center;">68,14</td> <td style="text-align: center;">53,70</td> <td style="text-align: center;">80,68</td> </tr> <tr> <td>0,500</td> <td style="text-align: center;">54,85</td> <td style="text-align: center;">20,92</td> <td style="text-align: center;">29,46</td> <td style="text-align: center;">39,59</td> </tr> <tr> <td>0,250</td> <td style="text-align: center;">7,59</td> <td style="text-align: center;">1,21</td> <td style="text-align: center;">12,90</td> <td style="text-align: center;">6,74</td> </tr> <tr> <td>0,125</td> <td style="text-align: center;">0,75</td> <td style="text-align: center;">0,21</td> <td style="text-align: center;">5,47</td> <td style="text-align: center;">1,53</td> </tr> <tr> <td>0,063</td> <td style="text-align: center;">0,22</td> <td style="text-align: center;">0,03</td> <td style="text-align: center;">1,43</td> <td style="text-align: center;">0,41</td> </tr> <tr> <td>Resíduo</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Módulos de finura</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">2,379</td> <td style="text-align: center;">3,176</td> <td style="text-align: center;">3,166</td> <td style="text-align: center;">2,775</td> </tr> </tbody> </table>						Abertura da malha (mm)	Areia 0/2 a1	Areia 0/4 a2	Areia R a3	Mistura (Curva Real)		0,50	0,30	0,20		Percentagem de passados					8,000	100,00	100,00	100,00	100,00	4,000	100,00	99,15	99,91	99,73	2,000	99,96	92,78	81,92	94,20	1,000	99,00	68,14	53,70	80,68	0,500	54,85	20,92	29,46	39,59	0,250	7,59	1,21	12,90	6,74	0,125	0,75	0,21	5,47	1,53	0,063	0,22	0,03	1,43	0,41	Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	Módulos de finura						2,379	3,176	3,166	2,775
Abertura da malha (mm)	Areia 0/2 a1	Areia 0/4 a2	Areia R a3	Mistura (Curva Real)																																																																							
	0,50	0,30	0,20																																																																								
Percentagem de passados																																																																											
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00																																																																							
4,000	100,00	99,15	99,91	99,73																																																																							
2,000	99,96	92,78	81,92	94,20																																																																							
1,000	99,00	68,14	53,70	80,68																																																																							
0,500	54,85	20,92	29,46	39,59																																																																							
0,250	7,59	1,21	12,90	6,74																																																																							
0,125	0,75	0,21	5,47	1,53																																																																							
0,063	0,22	0,03	1,43	0,41																																																																							
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00																																																																							
Módulos de finura																																																																											
	2,379	3,176	3,166	2,775																																																																							
<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: right;">δp=</td> <td>2854,00kg/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vsp/Vp=</td> <td>0,01046 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vp=</td> <td>0,33328 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vw=</td> <td>0,24663 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vsp=</td> <td>0,00349 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vs=</td> <td>0,4166 m³/m³</td> </tr> </table>						δp=	2854,00kg/m³	Vsp/Vp=	0,01046 m³/m³	Vp=	0,33328 m³/m³	Vw=	0,24663 m³/m³	Vsp=	0,00349 m³/m³	Vs=	0,4166 m³/m³																																																										
δp=	2854,00kg/m³																																																																										
Vsp/Vp=	0,01046 m³/m³																																																																										
Vp=	0,33328 m³/m³																																																																										
Vw=	0,24663 m³/m³																																																																										
Vsp=	0,00349 m³/m³																																																																										
Vs=	0,4166 m³/m³																																																																										
<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"> Quantidades para um volume de: 1000,00 litros </td> <td style="width: 50%;"> Quantidades para um volume de: 1,60 litros </td> </tr> <tr> <td>C1= 418,6kg</td> <td>C1= 669,8 g</td> </tr> <tr> <td>C2= 0,0kg</td> <td>C2= 0,0 g</td> </tr> <tr> <td>CV= 79,3kg</td> <td>CV= 126,9 g</td> </tr> <tr> <td>MS= 0,0kg</td> <td>MS= 0,0 g</td> </tr> <tr> <td>FC= 453,3kg</td> <td>FC= 725,2 g</td> </tr> <tr> <td>FG= 0,0kg</td> <td>FG= 0,0 g</td> </tr> <tr> <td>W= 246,6litros</td> <td>W= 394,6 ml</td> </tr> <tr> <td>Sp= 3,49litros</td> <td>Sp= 5,58 ml</td> </tr> <tr> <td>S1= 554,3kg</td> <td>S1= 886,9 g</td> </tr> <tr> <td>S2= 330,8kg</td> <td>S2= 529,3 g</td> </tr> <tr> <td>S3= 192,5kg</td> <td>S3= 308,0 g</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><u>Massa total, em kg</u></td> <td style="text-align: right;"><u>Massa total, em g</u></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">2086,6</td> <td style="text-align: right;">3338,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><u>Razão água/mat. cimentícios)</u></td> <td style="text-align: right;"><u>Razão água/mat. cimentícios)</u></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">0,495</td> <td style="text-align: right;">0,495</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><u>Razão água/cimento</u></td> <td style="text-align: right;"><u>Razão água/cimento</u></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">0,589</td> <td style="text-align: right;">0,589</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><u>Razão água/finos</u></td> <td style="text-align: right;"><u>Razão água/finos</u></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">0,259</td> <td style="text-align: right;">0,259</td> </tr> </table>						Quantidades para um volume de: 1000,00 litros	Quantidades para um volume de: 1,60 litros	C1= 418,6kg	C1= 669,8 g	C2= 0,0kg	C2= 0,0 g	CV= 79,3kg	CV= 126,9 g	MS= 0,0kg	MS= 0,0 g	FC= 453,3kg	FC= 725,2 g	FG= 0,0kg	FG= 0,0 g	W= 246,6litros	W= 394,6 ml	Sp= 3,49litros	Sp= 5,58 ml	S1= 554,3kg	S1= 886,9 g	S2= 330,8kg	S2= 529,3 g	S3= 192,5kg	S3= 308,0 g	<u>Massa total, em kg</u>	<u>Massa total, em g</u>	2086,6	3338,5	<u>Razão água/mat. cimentícios)</u>	<u>Razão água/mat. cimentícios)</u>	0,495	0,495	<u>Razão água/cimento</u>	<u>Razão água/cimento</u>	0,589	0,589	<u>Razão água/finos</u>	<u>Razão água/finos</u>	0,259	0,259																														
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros	Quantidades para um volume de: 1,60 litros																																																																										
C1= 418,6kg	C1= 669,8 g																																																																										
C2= 0,0kg	C2= 0,0 g																																																																										
CV= 79,3kg	CV= 126,9 g																																																																										
MS= 0,0kg	MS= 0,0 g																																																																										
FC= 453,3kg	FC= 725,2 g																																																																										
FG= 0,0kg	FG= 0,0 g																																																																										
W= 246,6litros	W= 394,6 ml																																																																										
Sp= 3,49litros	Sp= 5,58 ml																																																																										
S1= 554,3kg	S1= 886,9 g																																																																										
S2= 330,8kg	S2= 529,3 g																																																																										
S3= 192,5kg	S3= 308,0 g																																																																										
<u>Massa total, em kg</u>	<u>Massa total, em g</u>																																																																										
2086,6	3338,5																																																																										
<u>Razão água/mat. cimentícios)</u>	<u>Razão água/mat. cimentícios)</u>																																																																										
0,495	0,495																																																																										
<u>Razão água/cimento</u>	<u>Razão água/cimento</u>																																																																										
0,589	0,589																																																																										
<u>Razão água/finos</u>	<u>Razão água/finos</u>																																																																										
0,259	0,259																																																																										

Na tabela 3.5 podem observar-se, conforme as percentagens do teor de água superficial dos agregados saturados, as respetivas correções automáticas executadas pela folha de cálculo do EXCEL, que permitem obter uma argamassa adequada.

Tabela 3.5 - Correções da amassadura em função do teor em água superficial dos agregados finos.

CORREÇÕES DA AMASSADURA EM FUNÇÃO DO TEOR EM ÁGUA SUPERFICIAL DOS AGREGADOS FINOS				
Teor em água superficial dos agregados, em %				
Hs1	Hs2	Hs3	---	---
7,41	2,01	4,00	---	---
Nota: O teor em água superficial tem por referência o agregado saturado com a superfície seca				
Dosagens corrigidas para o volume de: <input type="text" value="1000,00"/> litros			Dosagens corrigidas para o volume de: <input type="text" value="1,60"/> litros	
C1=	418,6kg	C1=	669,8g	
C2=	0,0kg	C2=	0,0g	
CV=	79,3kg	CV=	126,9g	
MS=	0,0kg	MS=	0,0g	
FC=	453,3kg	FC=	725,2g	
FG=	0,0kg	FG=	0,0g	
W=	187,7litros	W=	300,36ml, ou (300,4) g	
Sp=	3,49litros	Sp=	5,58ml, ou (5,9) g	
S1=	595,4kg	S1=	952,6g	
S2=	337,5kg	S2=	540,0g	
S3=	200,2kg	S3=	320,3g	

3.5.1.1. Parâmetros de cálculo

No estudo da composição das argamassas houve necessidade de utilizar determinados parâmetros chave (presentes na tabela 3.4), os quais relacionam as diferentes quantidades de materiais existentes nas argamassas. Entre os parâmetros podem encontrar-se:

1. **(Vp/Vs)** - Define a relação em volume absoluto entre as quantidades de finos e de agregados finos;
2. Parâmetros que definem os constituintes finos: as percentagens unitárias em volume absoluto do cimento Portland CEM I 42,5R (fc1), das cinzas volantes (fcv) e do fíler calcário (ffc). Estas percentagens equivalem ao (Vp) que é volume absoluto do total de material fino. A participação destas percentagens relativas dos diferentes materiais finos pode traduzir-se:

$$Vp = fc1 \times Vp + fcv \times Vp + ffc \times Vp \quad (3.3)$$

3. **(Vs)** - Parâmetro absoluto de agregados finos. Na totalidade, este parâmetro compõe-se pela percentagem unitária em volume absoluto da Areia 0/2 (a1), pela percentagem unitária em volume absoluto da Areia 0/4 (a2), e pela percentagem unitária em volume absoluto da Areia reciclada (a3). Pode ser definido pela seguinte expressão:

$$V_s = a_1 \times V_s + a_2 \times V_s + a_3 \times V_s \quad (3.4)$$

4. **(Vw/Vp)** - Define a relação em volume absoluto entre as quantidades de água e de materiais finos;
5. **(Sp/P%)** - Representa a relação percentual em massa entre as dosagens de superplastificante e de materiais finos.

A fórmula fundamental do cálculo das argamassas apresenta a seguinte configuração, ao ser assumida como unidade de volume o m³:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} + V_v = 1,0 \quad (3.5)$$

Em que:

V_p - Volume absoluto de materiais finos, em m³/m³;

V_w - Volume de água, em m³/m³;

V_s - Volume absoluto de agregados finos, em m³/m³;

V_{sp} - Volume de superplastificante, em m³/m³;

V_v - Volume de vazios, em m³/m³.

O volume de vazios é desprezado dando origem a uma alteração na expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} = 1,0 \quad (3.6)$$

Isto equivale:

$$V_p + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \times V_p + \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} \times V_p + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) \times V_p = 1,0 \quad (3.7)$$

Modificando a expressão obtêm-se:

$$V_p = \frac{1,0}{1 + \left(\frac{V_w}{V_p}\right) + \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} + \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right)} \quad (3.8)$$

Onde:

$$V_w = \left(\frac{V_w}{V_p}\right) \times V_p \quad (3.9)$$

$$V_{sp} = \left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) \times V_p \quad (3.10)$$

$$V_s = \frac{V_p}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)} \quad (3.11)$$

Das referidas expressões anteriores, apenas o parâmetro (V_{sp}/V_p) não é conhecido, porém o seu cálculo pode ser efetuado através da expressão:

$$\left(\frac{V_{sp}}{V_p}\right) = \left(\frac{Sp}{P}\right) \times \frac{\delta_P}{\delta_{SP}} \quad (3.12)$$

Em que:

$$\delta_P = fc1 \times \delta_{c1} + fcv \times \delta_{cv} + ffc \times \delta_{fc} \quad (3.13)$$

e

$$\left(\frac{Sp}{P}\right) = \left(\frac{Sp}{p} \%\right) / 100 \quad (3.14)$$

Assim que se dá a conhecer o valor de (V_p) torna-se possível fazer a avaliação das dosagens dos materiais finos. Essa avaliação é efetuada através das seguintes expressões:

$$V_{c1} = fc1 \times V_p \quad (3.15)$$

$$V_{cv} = fcv \times V_p \quad (3.16)$$

$$V_{fc} = ffc \times V_p \quad (3.17)$$

Onde:

V_{c1} - Volume absoluto de cimento tipo I 42,5R, em m^3/m^3 ;

V_{cv} - Volume absoluto de cinzas volantes, em m^3/m^3 ;

V_{fc} - Volume absoluto de fíler calcário, em m^3/m^3 .

Note-se que não se faz referência a alguns dos parâmetros. Isto acontece porque estes assumem o significado de uma indicação efetuada previamente.

De forma semelhante, após a determinação de (V_s) podem ser calculadas as diferentes dosagens de agregados finos:

$$V_{s1} = a_1 \times V_s \quad (3.18)$$

$$V_{s2} = a_2 \times V_s \quad (3.19)$$

$$V_{s3} = a_3 \times V_s \quad (3.20)$$

Em que:

V_{s1} - Volume absoluto do agregado fino 1 (Areia 0/2), em m^3/m^3 ;

V_{s2} - Volume absoluto do agregado fino 2 (Areia 0/4), em m^3/m^3 ;

V_{s3} - Volume absoluto do agregado fino 3 (Areia reciclada), em m^3/m^3 ;

a_1 - Percentagem unitária do agregado fino 1 (Areia 0/2);

a_2 - Percentagem unitária do agregado fino 2 (Areia 0/4);

a_3 - Percentagem unitária do agregado fino 3 (Areia reciclada).

Por fim, conhecendo todas as dosagens em volume absoluto, torna-se possível convertê-las para valores em massa, através das respectivas massas volúmicas. Os resultados finais em massa correspondem a dosagens por metro cúbico de betão.

3.6. Produção de argamassas

Para a realização das misturas laboratorialmente, foi necessário tomar em atenção as condições definidas anteriormente nas tabelas 3.4 e 3.5, de onde constam os materiais e respectivas dosagens, para cada uma das diferentes associações de argamassas. Foram então produzidas, utilizando os mesmos procedimentos de amassadura, dois tipos de séries de argamassas, onde uma série 1 correspondeu a uma mistura binária (cimento + uma adição), e uma série 2, de misturas terciárias (cimento + duas adições). É preciso referir que os procedimentos de amassadura foram os mesmos aplicados por PINTO (2011) estando as etapas do respetivo processo representadas na figura 3.5.

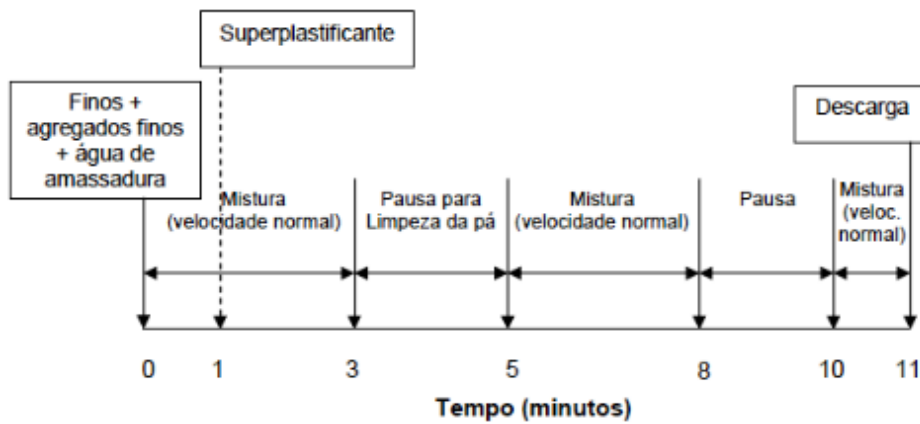


Figura 3.5 - Processo de amassadura aplicado [NEPOMUCENO, 2005].

A seqüência de produção da argamassa teve início com a adição da totalidade de água de amassadura à porção fina da mistura, com o objetivo de evitar projeções (caso de misturas extremamente secas) do recipiente da misturadora. Sensivelmente 20 segundos após o início da amassadura foi introduzido o adjuvante (superplastificante), sem que houvesse uma paragem do movimento das pás. Durante o período de mistura foi necessário executar uma paragem para proceder à limpeza das pás, tendo em vista uma garantia de homogeneidade das misturas. A misturadora utilizada é programável e destinada à produção de pastas e argamassas normalizadas (figura 3.6). Apesar do fato da misturadora ser programável, esta foi controlada manualmente, tanto no aspeto da entrada dos componentes como também das paragens e arranques. Relativamente à medição do tempo de mistura, esta foi efetuada com a ajuda de um cronómetro.



Figura 3.6 - Misturadora utilizada na preparação das argamassas.

3.7. Ensaio realizados em argamassas no estado fresco

Nas argamassas em estado fresco, são utilizados métodos que possibilitam avaliações dos parâmetros fundamentais reológicos, os quais estão diretamente ligados ao desempenho do comportamento de pastas, argamassas e betões. Esses ensaios são recorrentemente utilizados em estudos por todo o mundo, encontrando-se bem documentados. Ensaio empíricos como os ensaios de espalhamento e de fluidez são aqueles que não permitem uma avaliação direta dos parâmetros da reologia, sendo necessário recorrer a expressões matemáticas. Pelo ensaio de espalhamento do cone é possível avaliar a tensão de cedência, parâmetro relativo à deformabilidade, fazendo a medição do diâmetro de espalhamento máximo da argamassa. Quanto ao ensaio de fluidez, este permite a avaliação da viscosidade plástica. Outro tipo de ensaio que aqui é descrito é o do Reómetro, considerado um Ensaio Direto por gerar automaticamente, através de programa computacional, curvas de fluxo, as quais relacionando tensões e velocidades de corte, permitem uma análise de comportamento das argamassas. Este ensaio do Reómetro tem vantagem sobre os ensaios empíricos pois para além de avaliar as duas quantias fundamentais da tensão de cedência e da viscosidade plástica, também permite a medição da tixotropia dos materiais.

De seguida é efetuada uma descrição dos procedimentos que foram utilizados neste tipo de ensaios e também uma pequena ilustração dos equipamentos associados.

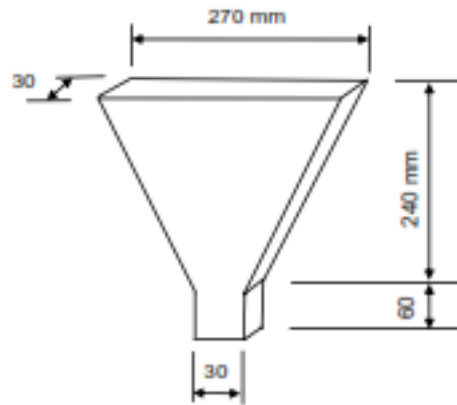
3.7.1. Ensaio empíricos

3.7.1.1. Ensaio de fluidez - Escoamento no “Funil-V”

O ensaio de fluidez efetuou-se recorrendo a um “Funil-V” de faces planas (figura 3.7), e a sua execução foi posta em prática em três etapas. Todo o ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12350-9 (2010). A partir do ensaio puderam ser determinados parâmetros como a fluidez e a viscosidade de materiais cimentícios (AZZOUZ, 2012). No entanto o tempo de escoamento do Funil-V pode ser influenciado por efeitos de bloqueio (REINHARDT e WÜSTHOLZ, 2006).

O procedimento para este ensaio iniciou-se com o posicionamento do funil em local nivelado e estável, de forma a evitar movimentos que pudessem influenciar o escoamento da argamassa. Após isto procedeu-se a uma limpeza do funil utilizando um pano ligeiramente húmido.

Na etapa imediata averiguaram-se as condições anteriores e procedeu-se ao enchimento do funil com argamassa (figura 3.8), nivelando de seguida a superfície da mesma, mas sem aplicar vibrações ou formas de compactação.



Ensaio de fluidez (Funil-V)

Figura 3.7 - Dimensão do “Funil-V” utilizado no ensaio de fluidez para argamassas [NEPOMUCENO, 2005].



Figura 3.8 - Enchimento do “Funil-V” com argamassa [NEPOMUCENO, 2005].

Por fim, procedeu-se à abertura da comporta inferior (figura 3.9) e com auxílio de um cronómetro efetuou-se a medição do tempo de escoamento. O cronómetro acionou-se aquando do momento exato da abertura da comporta, e foi interrompido no momento em que, observando o funil de cima para baixo, surgiu luminosidade no fundo do funil.



Figura 3.9 - Escoamento da argamassa no “Funil-V” [PINTO, 2011].

Nestes ensaios, como resposta, foram registados os tempos de escoamento t para as diferentes argamassas produzidas. Os valores medidos, relativos ao tempo de escoamento, expressam-se em unidade de tempo segundos. Para a avaliação dos resultados existe ainda uma expressão matemática (equação (3.21)) que foi desenvolvida por OKAMURA e seus colaboradores (FERRARIS, 1999; NEPOMUCENO, 2005; OKAMURA e OUCHI, 1999), com o objetivo de determinação da velocidade relativa de escoamento.

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (3.21)$$

Em que:

R_m - Velocidade relativa de escoamento da argamassa, em s^{-1} ;

t - Tempo de escoamento da argamassa, em segundos.

3.7.1.2. Ensaio de espalhamento do Cone

O ensaio de espalhamento foi efetuado utilizando como recurso um tronco cônico ou cone de espalhamento, com dimensões similares ao que se encontra ilustrado na figura 3.10. Este ensaio foi realizado tendo por base a norma NP EN 12350-8 (2010).



Figura 3.10 - Dimensão do cone utilizado no ensaio de espalhamento para argamassas [NEPOMUCENO, 2005].

Em termos de procedimento, pode considerar-se que este ensaio é realizado em 3 fases, as quais se descrevem seguidamente. Antes de dar início ao dito ensaio houve a necessidade de preparar o cone, sendo este posicionado sobre uma superfície lisa, desempenada, nivelada e sem saliências ou reentrâncias que pudessem influenciar o movimento da argamassa fresca durante o seu espalhamento. Para além disto, fez-se a limpeza da superfície de base do cone e do próximo cone com um pano ligeiramente húmido.

Depois de tudo preparado deu-se início à primeira fase do ensaio efetuando o enchimento do cone (figura 3.11) com argamassa no estado fresco, logo após amassadura da mesma, e alisando-se a superfície superior da argamassa, sem no entanto aplicar vibrações ou outras formas de compactação, sempre que necessário.



Figura 3.11 - Fase 1: Enchimento do cone com argamassa [NEPOMUCENO, 2005].

A etapa número dois consistiu no levantamento do tronco cônico, com o espalhamento consequente da argamassa (figura 3.12) até esta atingir o seu diâmetro máximo de espalhamento. Este momento aconteceu quando o movimento das argamassas sobre a bancada terminava.



Figura 3.12 - Fase 2: Levantamento do cone e espalhamento da argamassa [NEPOMUCENO, 2005].

Após o término do movimento da argamassa, procedeu-se à última parte do ensaio fazendo a medição, de dois diâmetros segundo direções perpendiculares, como é demonstrado na figura 3.13. Após as medições efetuadas, convém referir que um diâmetro médio de espalhamento (D_m) foi calculado, e este sim foi a resposta do ensaio.



Figura 3.13 - Fase 3: Medição do diâmetro máximo de espalhamento [NEPOMUCENO, 2005].

Existe porém outra forma de expressar o resultado deste ensaio. Trata-se de fazer a aplicação de uma expressão matemática, equação (3.22), que permite a determinação de uma área de espalhamento relativa.

$$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 - 1 \quad (3.22)$$

Onde:

G_m - Área de espalhamento relativa;

D_m - Diâmetro médio de espalhamento, em mm;

D_0 - Diâmetro inicial na base do cone, em mm.

3.7.2. Ensaio direto

3.7.2.1. Reómetro - Viskomat NT

O reómetro Viskomat NT (figura 3.14) é composto por três unidades, sendo elas o próprio equipamento de medição, a eletrônica associada e o monitor, onde todas têm de estar conectadas entre si através de cabos. O reómetro é normalmente operado por um PC de controlo, porém também pode ser operado localmente sem o recurso a um PC de controlo (VISKOMAT, 2005).

Para realizar o ensaio do reómetro, o qual consistiu em 6 ou 7 passos, houve necessidade de efetuar alguns procedimentos preparatórios. Primeiro, verificou-se que o equipamento de medição estava sobre uma superfície nivelada horizontal e livre de vibrações, com o respetivo reómetro ligado a um PC através de uma conexão em rede, para possível operação do sistema.



Figura 3.14 - Unidades constituintes do reómetro Viskomat NT utilizado.

Depois do aparelho de medição se encontrar estabilizado e conectado ao PC, ligou-se no PC o respetivo programa Viskomat e procedeu-se à criação de um perfil de ensaio desejado, neste caso o perfil step (perfil escada). Este perfil foi criado a partir do menu principal do programa, ilustrado na figura 3.15, através da opção “Input”. O perfil do ensaio consistiu em 6 níveis de patamares, crescentes e depois decrescentes, de velocidade de rotação das pás (20 - 40 - 60 - 80 - 100 - 120 RPM), durante cerca de 11 minutos (figura 3.16).

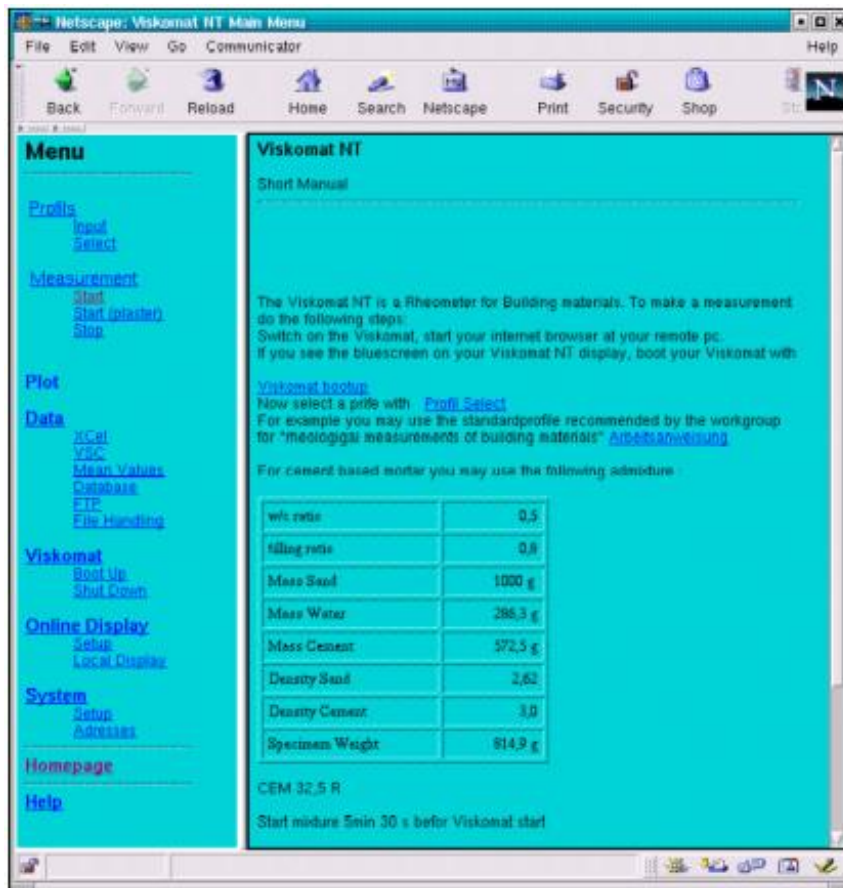


Figura 3.15 - Menu principal para operação do Viskomat NT [VISKOMAT, 2005].

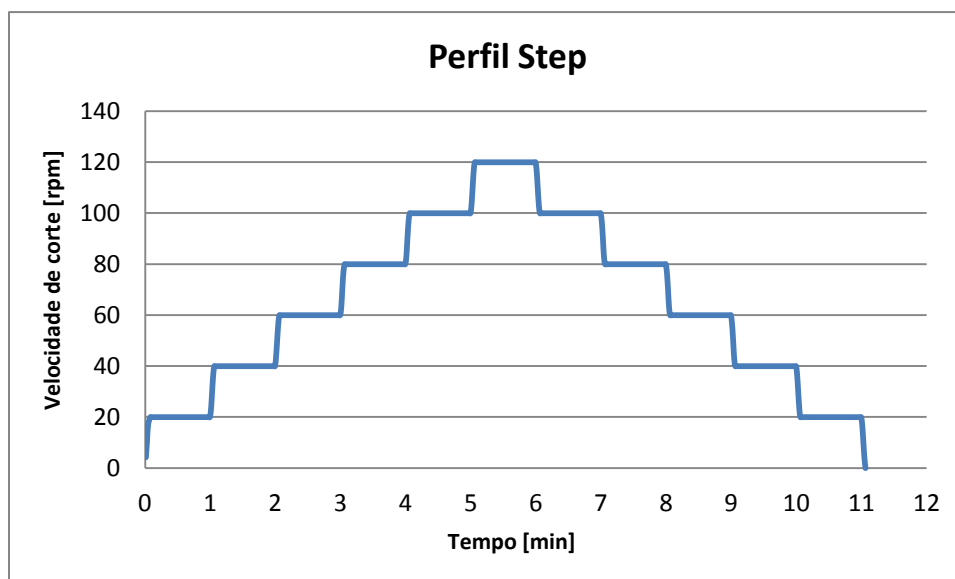


Figura 3.16 - Perfil de ensaio utilizado (Step).

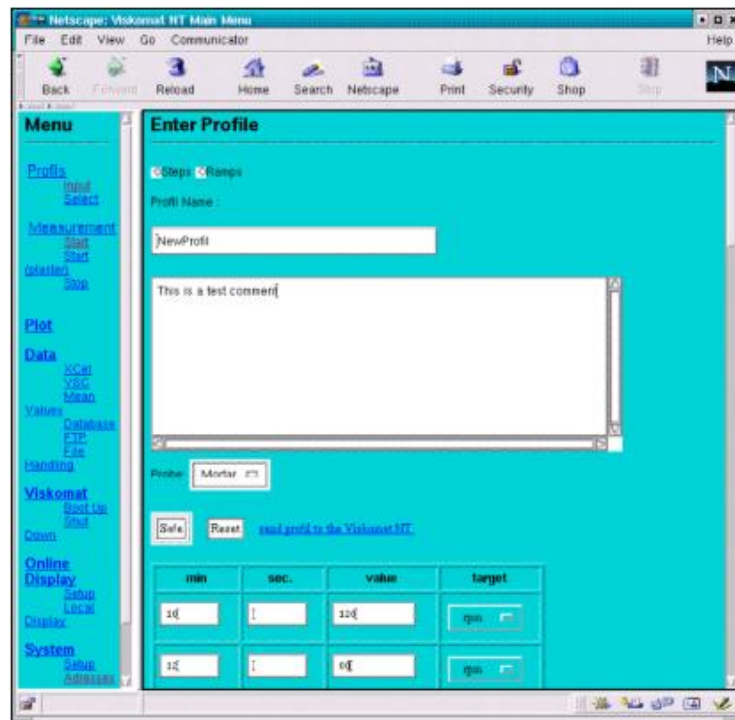


Figura 3.17 - Imagem de introdução do perfil no programa [VISKOMAT, 2005].

Após a criação do perfil, numa tela semelhante à ilustrada na figura 3.17, do perfil step, foi necessário preparar o aparelho de medição. Aqui, procedeu-se ao enchimento do recipiente de amostra com argamassa fresca, com posterior fixação deste na plataforma de medição. Para efetuar a fixação existe um sistema com dois pontos apropriados para o efeito, um na parede do recipiente da argamassa e um ponto vermelho auxiliar numa segunda parede de contenção do aparelho, o qual indica com precisão o ponto exato onde o recipiente deve ser colocado. Com o recipiente da argamassa fixo, seguiu-se a colocação das pás rotativas e respetiva fixação através de parafusos nelas existentes. Depois do posicionamento das pás efetuou-se a conexão destas à sonda de medição (cabecote de medição) utilizando um cabo próprio. É esta ligação que permite a transmissão de dados para o programa durante o decorrer dos ensaios das argamassas frescas.

Garantidas as condições anteriores, pôde dar-se início ao ensaio pretendido, efetuando através do programa Viskomat o envio do perfil criado (figura 3.18), podendo neste processo atribuir-se um título e comentários extra aos dados registados (ficheiro) do respetivo ensaio.

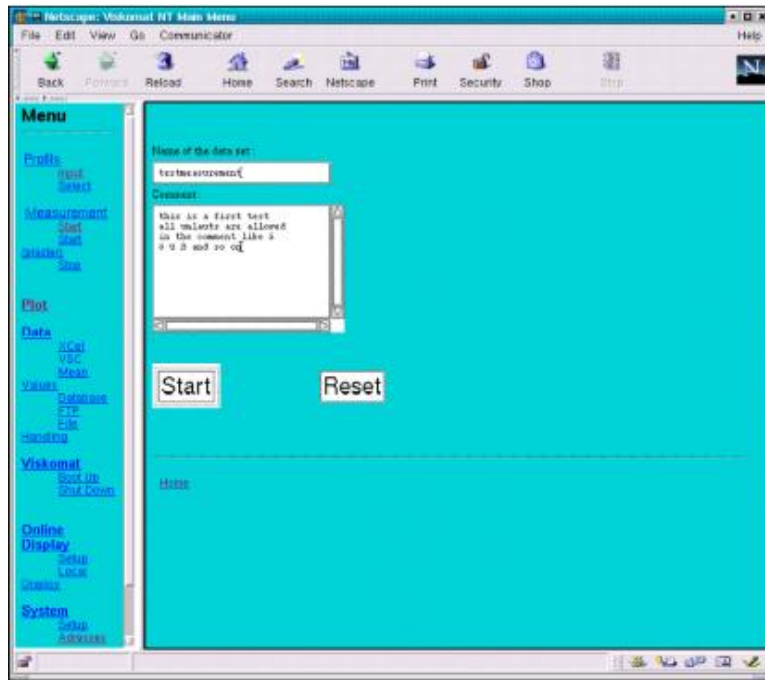


Figura 3.18 - Início da medição. Introdução do nome e comentários do ficheiro [VISKOMAT, 2005].

Por fim, dado por concluído o ensaio, procedeu-se à conversão dos respetivos valores de ensaio obtidos pelo reómetro para o formato Excel (figura 3. 19). Estando os valores no Excel é possível proceder ao seu tratamento e realizar os gráficos necessários para o estudo.

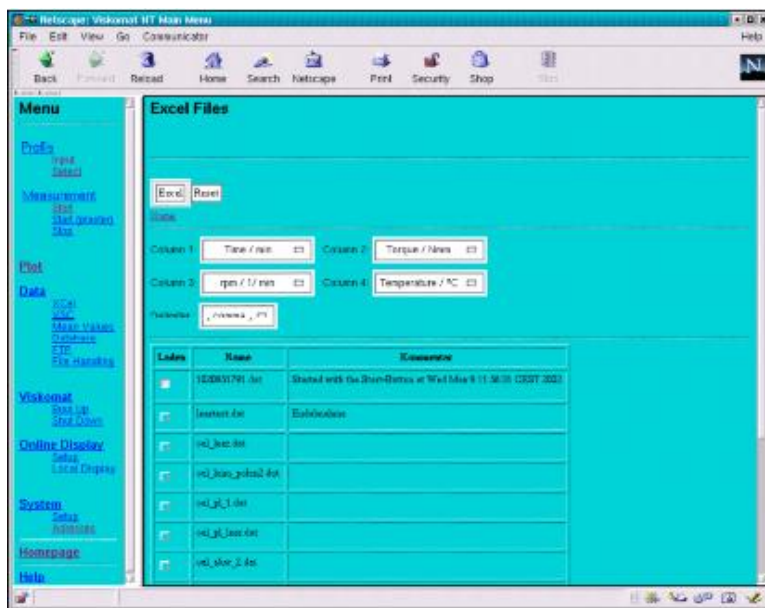


Figura 3.19 - Exportação de dados obtidos para o Excel [VISKOMAT, 2005].

Capítulo 4 - Tratamento, apresentação e discussão de resultados

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados provenientes dos ensaios realizados durante todo o trabalho experimental, os quais foram descritos no capítulo anterior. Previamente à apresentação dos resultados é efetuada uma descrição dos métodos utilizados durante o tratamento de dados. Paralelamente aos resultados apresentados procede-se a uma análise dos mesmos, com o objetivo de uma discussão das possíveis respostas a obter com o estudo efetuado.

4.2. Tratamento de dados estatísticos

4.2.1. Teste do valor extremo (Grubbs)

Por vezes, a influência de determinados fatores relacionados com os ensaios laboratoriais podem dar origem a valores atípicos em observações amostrais. Estes valores atípicos ou extremos podem definir-se como manifestações da variabilidade aleatória inerente aos dados, ou apenas a um erro no cálculo durante o recolhimento dos dados ou até mesmo uma anotação precipitada por parte do operador (GRUBBS, 1969).

Neste trabalho foi efetuado um cálculo numérico amostral (cálculo estatístico), onde se procedeu à comparação com um valor crítico baseado na teoria de amostras aleatórias, e onde se decidiu se existiam ou não observações consideradas valores extremos.

Neste teste recorre-se à expressão estatística descrita:

$$Z = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \quad (4.1)$$

Onde:

x_i - Valor da amostra;

\bar{x} - Média amostral;

s - Desvio padrão amostral;

Z - Valor de distribuição normal.

Quando o valor de Z é maior que o valor de Z_c (valor crítico baseado na distribuição de Z) pode afirmar-se que existe um ponto extremo ou aberrante.

Assim, os valores aberrantes existentes (valores com discrepância superior a 5% em relação à sua média) foram eliminados, tendo em vista uma maior confiabilidade do estudo.

Neste trabalho, que envolveu a utilização de um reómetro, pensa-se que o principal fator que originou alguns valores aberrantes terá sido a dimensão e formas irregulares de alguns agregados, nas argamassas, que momentaneamente terão interferido com o movimento das pás do reómetro.

O teste de Grubbs foi aplicado nos dados fornecidos pelo reómetro Viskomat NT, mais especificamente no valor das forças de torção, também conhecidas por tensões de corte.

4.3. Apresentação de resultados

A apresentação dos resultados será efetuada e discutida segundo a ordem já verificada na descrição do procedimento experimental. Numa primeira parte, procede-se à caracterização dos materiais utilizados (Item 4.3.1), seguindo-se pela definição das curvas granulométricas de referência dos agregados finos no subcapítulo 4.3.2 e pelo estudo das argamassas no subcapítulo 4.3.3. Em conclusão, são apresentadas as relações retiradas do estudo, no subcapítulo 4.3.4.

4.3.1. Caracterização dos materiais utilizados

4.3.1.1. Ligante

Decidiu-se neste item apresentar todos os resultados relativos ao ligante, neste caso do cimento, como forma de complemento informativo. Dado isto, para além dos valores relativos

aos ensaios efetuados em laboratório (tabela 4.1), também se apresentam os dados fornecidos pelo fabricante (SECIL), fazendo parte destes os ensaios mecânicos (tabela 4.2), os ensaios químicos (tabela 4.3), e os ensaios físicos (tabela 4.4).

O ensaio efetuado em laboratório correspondeu à determinação do valor da massa volúmica do cimento Portland (CEM I 42,5R). O resultado apresenta-se na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Massa volúmica do ligante CEM I 42,5R.

Tipo de material	Denominação comercial	Massa volúmica Valor médio [Kg/m ³]
Ligante	CEM I 42,5R	$\delta_{c1} = 3140$

Tabela 4.2 - Ensaio mecânicos do ligante CEM I 42,5R.

LIGANTE	ENSAIOS MECÂNICOS [NP EN 196-1]				
	Idade [dias]	Resistência [MPa]			
		Flexão		Compressão	
		Mensal	Anual	Mensal	Anual
CEM I 42,5R	2	5,5	6,1	32,5	33,4
	7	7,6	8,0	47,8	46,3
	28	8,8	9,2	59,3	58,0

Observações: Anual - Valor médio dos últimos 12 meses.

Tabela 4.3 - Análise química do ligante CEM I 42,5R.

ANÁLISE QUÍMICA			CEM I 42,5R	
			Mensal	Anual
Perda ao Fogo	%	P.F.	1,8	1,5
Resíduo Insolúvel	%	RI	1,1	1,3
Óxido de Silício	%	SiO ₂	20,31	21,08
Óxido de Alumínio	%	Al ₂ O ₃	4,33	4,84
Óxido de Ferro	%	Fe ₂ O ₃	3,11	3,12
Óxido de Cálcio	%	CaO	61,86	62,08
Óxido de Magnésio	%	MgO	3,60	3,41
Sulfatos	%	SO ₃	3,69	3,19
Óxido de Potássio	%	K ₂ O	---	---
Óxido de Sódio	%	Na ₂ O	---	---
Cloretos	%	Cl ⁻	0,02	0,02
Cal livre	%	---	1,49	1,67
N/D (não doseados)	%	---	1,50	1,03
Observações: Anual - Valor médio dos últimos 12 meses.				

Tabela 4.4 - Ensaio físicos do ligante CEM I 42,5R.

ENSAIOS FÍSICOS		CEM I 42,5R	
		Mensal	Anual
Peso Específico (g/m ³)		3,13	3,12
Resíduo de peneiração (%)	90 µm	---	---
	63 µm	---	---
	45 µm	3,4	4,4
	32 µm	---	---
Superfície Específica de Blaine (cm ² /g) [NP EN 196-6]		4009	3848
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		28,7	28,7
Tempo de presa (min) [NP EN 196-3]	Início	106	104
	Fim	137	136
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		0,9	0,9
Índice de Brancura (0 a 100)		---	---
Observações: Anual - Valor médio dos últimos 12 meses.			

4.3.1.2. Adições

Como já foi anteriormente referido, as adições utilizadas neste estudo foram o fíler calcário e as cinzas volantes. Relativamente às adições, foi apenas efetuado um ensaio laboratorial, o da determinação da massa volúmica. Na tabela 4.5 estão descritos os valores obtidos no respetivo ensaio.

Tabela 4.5 - Massa volúmica das adições.

Tipo de material	Denominação comercial	Massa volúmica Valor médio [Kg/m ³]
Fíler calcário	Betocarb P1 - OU	$\delta_{FC} = 2720$
Cinzas volantes	---	$\delta_{CV} = 2380$

Como complemento serão expostas algumas informações adicionais sobre as adições, as quais foram providenciadas pelos fornecedores. Estas informações basearam-se nos resultados obtidos nos ensaios de autocontrolo, realizados pelos próprios fornecedores. Primeiramente, nas tabelas 4.6 e 4.7 são apresentados valores dos parâmetros químicos do fíler calcário e da cinza volante, respetivamente. Após isto, segue-se a apresentação dos parâmetros físicos destes materiais (tabela 4.8 e 4.9).

Tabela 4.6 - Características químicas do fíler calcário.

Fíler Calcário: Betocarb P1 - OU	
Características químicas	Resultados (valores médios)
Carbonato de cálcio (CaCO ₃)	99,00 %
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	< 0,22 %
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	< 0,03 %
Insolúveis em HCl	< 0,04 %
Observação: Os resultados apresentados foram fornecidos pela empresa OMYA COMITAL.	

Tabela 4.7 - Características químicas das cinzas volantes.

Cinzas Volantes	
Características químicas	Resultados (valores médios)
Inqueimados	7,20 %
Ferro (FeO ₃)	7,64 %
Sódio (Na ₂ O)	1,10 %
Potássio (K ₂ O)	2,44 %
Magnésio (MgO)	0,65 %
Sulfatos (SO ₃)	0,33 %
Cloretos (Cl)	0,00 %
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,16 %
Titânio (TiO ₂)	0,67 %
Cal livre (CaO livre)	0,0 %
Observação: Os resultados apresentados foram obtidos a partir de valores fornecidos pela empresa TEJO ENERGIA - Produção e Distribuição de Energia Eléctrica, S.A..	

Tabela 4.8 - Características físicas do filer calcário.

Filer Calcário: Betocarb P1 - OU	
Características físicas	Resultados (valores médios)
Dureza na escala de Mohs	3
Índice de refração	1,55
Peso específico	2,7 g/cm ³
Perda ao fogo	43,36 %
pH - (ISO 787/9)	9
Teor de humidade (na expedição) - (ISO 787/2)	0,10 %
Densidade aparente - (ISO 903)	0,90 g/cm ³
Partículas < 325 µm - (ISO 787/7)	100 %
Corte superior - (ISO 787/2)	125 µm
Partículas < 80 µm - (ISO 787/7)	92,0 %
Partículas < 2 µm - (Sedigraph 5100)	15,0 %
Diâmetro médio (d50%) - (Sedigraph 5100)	5 µm
Observação: Os resultados apresentados foram fornecidos pela empresa OMYA COMITAL.	

Tabela 4.9 - Características físicas das cinzas volantes.

Cinzas Volantes	
Características físicas	Resultados (valores médios)
Finura (peneiro 45 μm)	14 %
Actividade resistente a 28 dias	89
Actividade resistente a 90 dias	159
Estabilidade volumétrica	0,5 mm
Observação: Os resultados apresentados foram obtidos a partir de valores fornecidos pela empresa TEJO ENERGIA - Produção e Distribuição de Energia Eléctrica, S.A..	

4.3.1.3. Agregados

Relativamente aos ensaios de caracterização dos agregados finos, foram efetuados os ensaios de determinação da massa volúmica e ensaios granulométricos. Como complemento, são também apresentados os valores de absorção de água dos agregados, anteriormente determinados por PINTO (2011).

Em termos de ordem de apresentação, surgem em primeiro lugar os resultados obtidos das massas volúmicas dos agregados (tabela 4.10), seguindo dos valores de absorção de água (tabela 4.11) registados por PINTO (2011). Por fim, descrevem-se os resultados das análises granulométricas. Respetivamente, nas tabelas 4.12, 4.13 e 4.14 são traduzidos os resultados da análise da Areia 0/2, da Areia 0/4 e da Areia reciclada.

Tabela 4.10 - Massa volúmica dos agregados finos.

Tipo de material	Denominação	Massa volúmica Valor médio [Kg/m^3]
Agregado fino	Areia 0/2	$\delta_{s1} = 2661$
	Areia 0/4	$\delta_{s2} = 2647$
	Areia reciclada	$\delta_{s3} = 2310$

Tabela 4.11 - Absorção de água dos agregados [PINTO, 2011].

Material		Absorção de água
Tipo	Designação	
Agregado fino	Areia 0/2	$A_{s,1}\% = 0,43$
Agregado fino	Areia 0/4	$A_{s,2}\% = 0,93$
Agregado fino	Areia Reciclada	$A_{s,3}\% = 9,19$

Tabela 4.12 - Análise granulométrica da Areia 0/2.

Agregado fino: Areia 0/2		Origem: Betão Liz - Figueira da Foz		
Abertura da malha [mm]	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
	[g]	[%]	Passados [%]	Retidos [%]
8,000	0,00	0,00	100,00	0,00
4,000	0,00	0,00	100,00	0,00
2,000	0,40	0,04	99,96	0,04
1,000	9,60	0,96	99,00	1,00
0,500	439,90	44,15	54,85	45,15
0,250	470,90	47,26	7,59	92,41
0,125	68,10	6,84	0,75	99,25
0,063	5,30	0,53	0,22	99,78
Resíduo	2,20	0,22	0,00	100,00
Total	996,40	100,00		

Peneiros para o cálculo do módulo de finura	
Módulo de finura do inerte:	2,379

Tabela 4.13 - Análise granulométrica da Areia 0/4.

Agregado fino: Areia 0/4		Origem: Betão Liz - Figueira da Foz		
Abertura da malha [mm]	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
	[g]	[%]	Passados [%]	Retidos [%]
8,000	0,00	0,00	100,00	0,00
4,000	8,50	0,85	99,15	0,85
2,000	64,10	6,38	92,78	7,23
1,000	247,70	24,64	68,14	31,87
0,500	474,80	47,22	20,92	79,09
0,250	198,10	19,70	1,21	98,79
0,125	10,10	1,00	0,21	99,79
0,063	1,80	0,18	0,03	99,97
Resíduo	0,30	0,03	0,00	100,00
Total	1005,40	100,00		

Peneiros para o cálculo do módulo de finura	
Módulo de finura do inerte:	3,176

Tabela 4.14 - Análise granulométrica da Areia reciclada.

Agregado fino: Areia reciclada		Origem: UBI		
Abertura da malha [mm]	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
	[g]	[%]	Passados [%]	Retidos [%]
9,520	0,00	0,00	100,00	0,00
4,760	4,30	0,09	99,91	0,09
2,380	860,50	17,99	81,92	18,08
1,190	1349,20	28,21	53,70	46,30
0,590	1159,60	24,25	29,46	70,54
0,297	791,90	16,56	12,90	87,10
0,149	355,20	7,43	5,47	94,53
0,074	193,20	4,04	1,43	98,57
Resíduo	68,40	1,43	0,00	100,00
Total	4782,30	100,00		

Peneiros para o cálculo do módulo de finura	
Módulo de finura do inerte:	3,166

Para que a informação acerca dos resultados da análise granulométrica dos agregados finos ficasse mais facilmente assimilável, decidiu-se resumir os resultados dos três tipos de

agregados em apenas uma tabela (tabela 4.15) e ilustrar os valores graficamente na figura 4.1. Na tabela 4.15, na segunda coluna a contar da direita pode ser observada a curva de referência representando a granulometria da mistura otimizada por NEPOMUCENO (2005). Neste estudo essa curva foi também utilizada e serviu de referência na composição das misturas de agregado fino.

Tabela 4.15 - Resumo dos resultados da análise granulométrica dos agregados finos.

Abertura da malha [mm]	Areia 0/2 - Betão Liz	Areia 0/4 - Betão Liz	Areia reciclada	Mistura (Curva Ref.)	Malha utilizada por Nepomuceno [mm]
	a1	a2	a3		
	Percentagem de passados				
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00	9,520
4,000	100,00	99,15	99,91	99,96	4,760
2,000	99,96	92,78	81,92	99,12	2,380
1,000	99,00	68,14	53,70	90,81	1,190
0,500	54,85	20,92	29,46	62,30	0,590
0,250	7,59	1,21	12,90	21,05	0,297
0,125	0,75	0,21	5,47	4,72	0,149
0,063	0,22	0,03	1,43	0,85	0,074
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	Resíduo
	Módulo de finura				
	2,379	3,176	3,166	2,220	

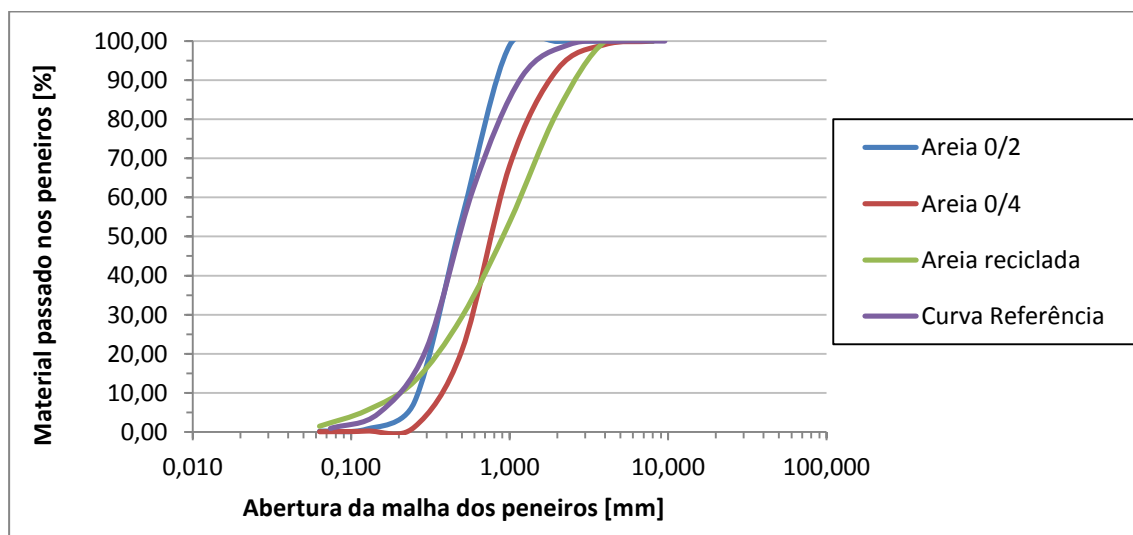


Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados.

4.3.1.4. Adjuvantes

Na produção das argamassas para este estudo, foi utilizado como adjuvante um produto comercialmente designado por Sika® ViscoCrete® 3005, o qual é considerado um superplastificante de alto desempenho. Este adjuvante é produzido pela empresa Sika-Portugal e possui as características apresentadas na tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Características do superplastificante.

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

4.3.2. Curvas de referência dos agregados finos

4.3.2.1. Argamassas de referência binárias e ternárias

Neste estudo foi necessária a produção de dois tipos de argamassas, uma argamassa binária (contendo cimento + fíler calcário) e uma argamassa ternária (contendo cimento + fíler calcário + cinza volante). Tendo em conta a existência desses dois tipos distintos de mistura, para efeitos comparativos com as restantes argamassas produzidas, possuindo percentagens crescentes de agregado fino reciclado, foram criadas duas argamassas (um binária e outra ternária) sem quaisquer vestígios de agregado reciclado, às quais se atribuiu o nome de misturas de referência.

Os resultados obtidos da análise à fração granulométrica dos agregados finos naturais, Areia 0/2 e Areia 0/4, constituintes dessas argamassas de referência apresentam-se seguidamente. Podem ser observadas na tabela 4.17 as percentagens unitárias das Areias 0/2 e 0/4. Para além disto, uma curva granulométrica real (Curva Real) resultante da combinação destes dois agregados finos naturais, e uma curva granulométrica de referência (Curva de Referência), são também apresentadas.

Tabela 4.17 - Mistura da curva Real e de Referência dos agregados finos naturais.

Abertura da malha [mm]	Areia 0/2 - Betão Liz	Areia 0/4 - Betão Liz	Areia reciclada	Mistura (Curva Real)	Mistura (Curva Ref.)	Erro médio percentual
	a1	a2	a3			
	0,50	0,50	0,00			
Percentagem de passados						
8,000	100,00	100,00	-	100,00	100,00	0,00
4,000	100,00	99,15	-	99,58	99,96	0,38
2,000	99,96	92,78	-	96,37	99,12	2,75
1,000	99,00	68,14	-	83,57	90,81	7,24
0,500	54,85	20,92	-	37,89	62,30	24,41
0,250	7,59	1,21	-	4,40	21,05	16,65
0,125	0,75	0,21	-	0,48	4,72	4,24
0,063	0,22	0,03	-	0,13	0,85	0,72
Residuo	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
Módulo de finura						
	2,379	3,176	7,000	2,777	2,220	6,266

Na figura 4.2 encontram-se representadas graficamente a curva real obtida e a curva de referência adotada, dos agregados finos naturais. Em análise à figura 4.2, e efetuando uma comparação entre as curvas acima referidas, com uma associação equivalente de 50% em Areia 0/2 e Areia 0/4, denota-se uma grande proximidade entre as curvas real e de referência. Caso houvesse necessidade de tornar as curvas ainda mais próximas seria necessário proceder a um incremento da parcela mais fina de agregado (Areia 0/2). No entanto a opção adotada foi a de não fazer nenhum ajuste para que não houvesse, na mistura, Areia 0/2 em excesso, assim como já procedera PINTO (2011).

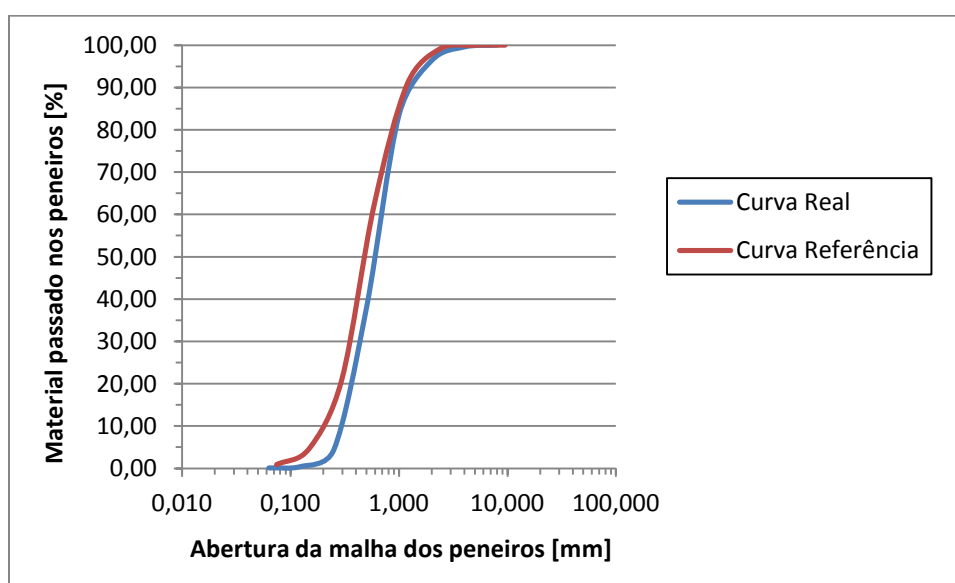


Figura 4.2 - Curvas granulométricas das misturas de agregados finos (Real e de Referência).

4.3.2.2. Argamassas com incorporação de agregados reciclados

Tendo como base as referidas argamassas de referência, binária e ternária, houve a necessidade de proceder à incorporação de agregados finos reciclados, sucessivamente, e em percentagens crescentes de 10%, em substituição dos agregados finos naturais (Areia 0/4), dos 10% até ao limite de 50% de substituição. Quando o limite de substituição (50%) é atingido significa que a totalidade de Areia 0/4 natural é substituída por Areia reciclada.

Pela observação dos gráficos e comparando a curva real e a curva de referência, nos três casos de substituição, pode verificar-se que as curvas estiveram sempre muito próximas. Este resultado vai de encontro ao objetivo pretendido que era de manter a curva resultante da combinação dos diferentes agregados finos relativamente constante em todas as argamassas. Como já havia referido PINTO (2011), pelo fato da curva granulométrica do agregado fino reciclado ser muito próxima da curva granulométrica da Areia 0/4, bastou proceder à substituição gradual de uma pela outra. Pela razão apresentada, e pela conservação da mesma estrutura granular após essa substituição, não foi necessário alterar a percentagem unitária da Areia 0/2 (50%) tendo sido mantida, durante todo o estudo, constante.

Interessa neste subcapítulo apenas realizar a apresentação de três situações: ambas as situações limite (10% e 50%, de substituição de AFN por AFR) e a situação relativamente intermédia dos 30% de substituição. Conforme o que é dito, apresentam-se as percentagens unitárias dos agregados finos quando é introduzida 10%, 30% e 50% de Areia reciclada. Estas são indicadas, respetivamente, nas tabelas 4.18, 4.19 e 4.20. Por sua vez, são representadas graficamente a curva real e de referência, verificadas para cada caso percentual de substituição (10%, 30% e 50%). Estas encontram-se ilustradas nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5, respetivamente.

Tabela 4.18 - Substituição de Areia natural 0/4 por 10% de Areia reciclada.

Abertura da malha [mm]	Areia 0/2 - Betão Liz	Areia 0/4 - Betão Liz	Areia reciclada	Mistura (Curva Real)	Mistura (Curva Ref.)	Erro médio percentual
	a1	a2	a3			
	0,50	0,40	0,10			
Percentagem de passados						
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
4,000	100,00	99,15	99,91	99,65	99,96	0,31
2,000	99,96	92,78	81,92	95,28	99,12	3,84
1,000	99,00	68,14	53,70	82,13	90,81	8,68
0,500	54,85	20,92	29,46	38,74	62,30	23,56
0,250	7,59	1,21	12,90	5,57	21,05	15,48
0,125	0,75	0,21	5,47	1,01	4,72	3,71
0,063	0,22	0,03	1,43	0,27	0,85	0,58
Residuo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulo de finura						
	2,379	3,176	3,166	2,776	2,220	6,240

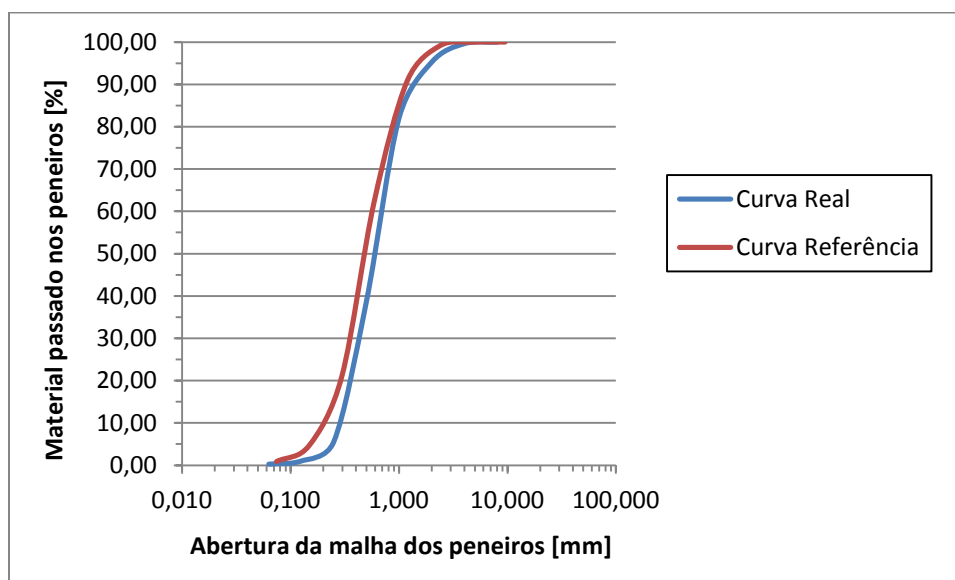


Figura 4.3 - Substituição de Areia natural 0/4 por 10% de Areia reciclada.

Tabela 4.19 - Substituição de Areia natural 0/4 por 30% de Areia reciclada.

Abertura da malha [mm]	Areia 0/2 - Betão Liz	Areia 0/4 - Betão Liz	Areia reciclada	Mistura (Curva Real)	Mistura (Curva Ref.)	Erro médio percentual
	a1	a2	a3			
	0,50	0,20	0,30			
Percentagem de passados						
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
4,000	100,00	99,15	99,91	99,80	99,96	0,16
2,000	99,96	92,78	81,92	93,11	99,12	6,01
1,000	99,00	68,14	53,70	79,24	90,81	11,57
0,500	54,85	20,92	29,46	40,45	62,30	21,85
0,250	7,59	1,21	12,90	7,91	21,05	13,14
0,125	0,75	0,21	5,47	2,06	4,72	2,66
0,063	0,22	0,03	1,43	0,55	0,85	0,30
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulo de finura						
	2,379	3,176	3,166	2,774	2,220	6,188

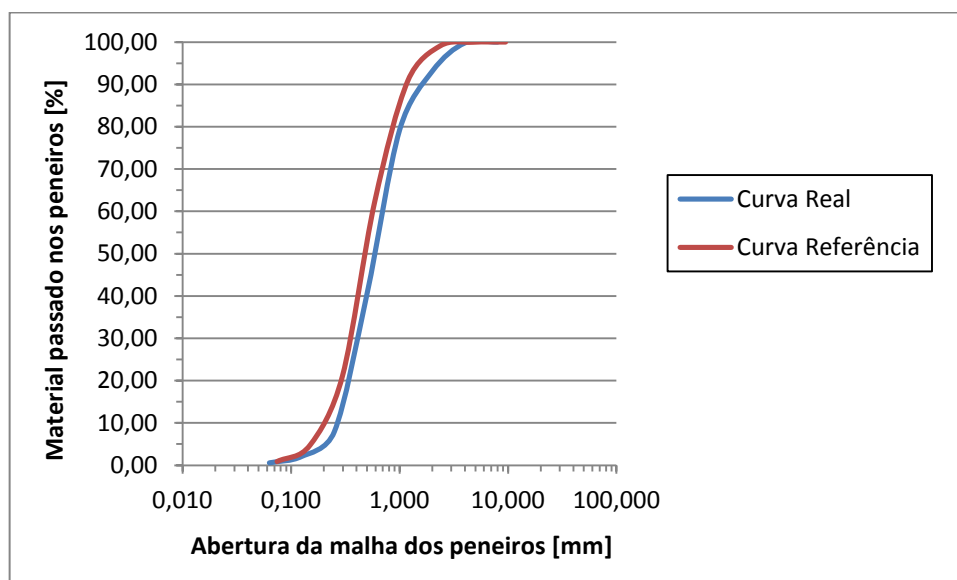


Figura 4.4 - Substituição de Areia natural 0/4 por 30% de Areia reciclada.

Tabela 4.20 - Substituição de Areia natural 0/4 por 50% de Areia reciclada.

Abertura da malha [mm]	Areia 0/2 - Betão Liz	Areia 0/4 - Betão Liz	Areia reciclada	Mistura (Curva Real)	Mistura (Curva Ref.)	Erro médio percentual
	a1	a2	a3			
	0,50	0,00	0,50			
Percentagem de passados						
8,000	100,00	-	100,00	100,00	100,00	0,00
4,000	100,00	-	99,91	99,96	99,96	0,00
2,000	99,96	-	81,92	90,94	99,12	8,18
1,000	99,00	-	53,70	76,35	90,81	14,46
0,500	54,85	-	29,46	42,16	62,30	20,14
0,250	7,59	-	12,90	10,25	21,05	10,80
0,125	0,75	-	5,47	3,11	4,72	1,61
0,063	0,22	-	1,43	0,83	0,85	0,02
Resíduo	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulo de finura						
	2,379	7,000	3,166	2,772	2,220	6,134

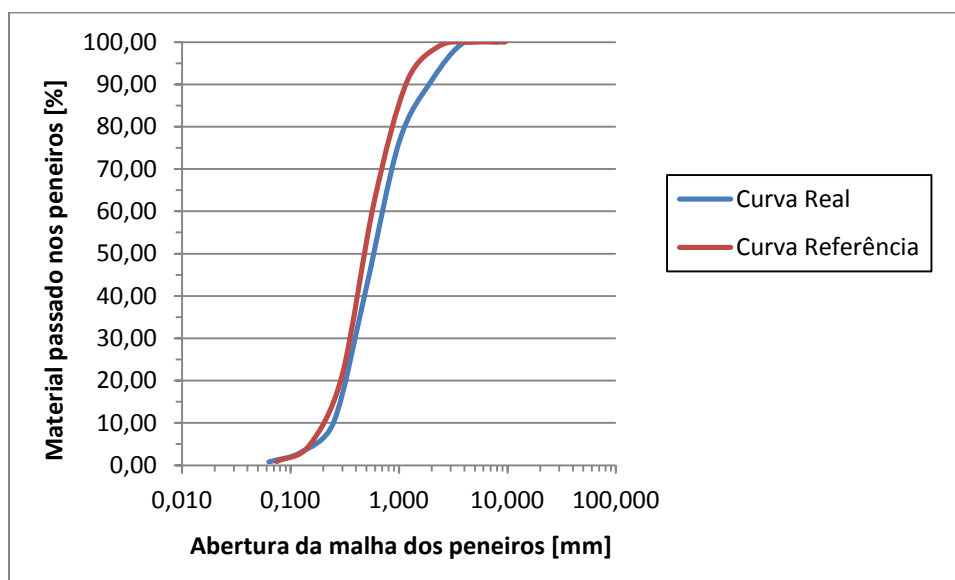


Figura 4.5 - Substituição de Areia natural 0/4 por 50% de Areia reciclada.

4.3.3. Estudo das argamassas

4.3.3.1. Introdução

O respetivo trabalho experimental, já descrito no Capítulo 3, compreendeu a produção de um determinado número de argamassas com características distintas, onde havia o objetivo de

proceder ao estudo individual do comportamento reológico de cada argamassa. Ao todo foram produzidas 22 argamassas compreendidas em duas séries distintas, uma Série 1 consistindo numa mistura binária e outra, Série 2, numa mistura ternária de materiais finos. Cada uma das séries englobou metade do número total de argamassas produzidas, ou seja, 11 argamassas, das quais 6 corresponderam a argamassas corrigidas e as restantes 5 a argamassas originais, assim chamadas por conterem volume de água e de superplastificante igual à das respetivas argamassas de referência.

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos no programa experimental, acompanhados de respetiva análise e discussão. Primeiramente são apresentadas e analisadas as argamassas corrigidas da Série 1, binárias, no ponto 4.3.3.2, seguindo-se um igual procedimento nas argamassas corrigidas da Série 2, ternária, no ponto 4.3.3.3. Após a análise individual das argamassas corrigidas, de ambas as séries, é efetuada uma análise comparativa entre as mesmas (ponto 4.3.3.4). No ponto 4.3.3.5 é efetuado o estudo das tensões de cedência das argamassas originais das Séries 1 e 2. Relativamente ao ponto 4.3.3.6, são avaliadas as diferenças reológicas entre as argamassas corrigidas e as argamassas originais. No ponto 4.3.3.7, apresentam-se possíveis correlações entre os parâmetros reológicos das várias misturas e os respetivos valores obtidos nos ensaios empíricos (Ensaio de espalhamento do cone e ensaio de fluidez do “Funil-V”). Por fim, no ponto 4.3.3.8 apresenta-se uma síntese conclusiva dos resultados obtidos no estudo.

4.3.3.2. Argamassas de associação binária (Série 1)

Como já foi referido no Capítulo 3, a Série 1 produzida experimentalmente contou com um total de 11 argamassas, as quais continham em sua composição percentagens definidas de cerca de 40% de cimento Portland CEM I 42,5R e de 60% de fíler calcário. De forma a possuir uma argamassa que servisse para efeitos de comparação (argamassa de referência), sabendo que se iria efetuar a incorporação de agregados finos reciclados por substituição gradual em incrementos de 10% dos agregados finos naturais, decidiu-se incluir apenas agregados finos naturais na primeira argamassa. Nas restantes 10 argamassas houve uma repetição das composições e das percentagens no material fino substituído. A única diferença verificada entre estas argamassas estava no valor do volume de água e de superplastificante (5 argamassas possuíram volume de água e de superplastificante corrigido enquanto as restantes 5 argamassas com volumes de água e superplastificante iguais aos da argamassa de referência). A variação nos volumes de materiais constituintes das diferentes argamassas, água e superplastificante, permitiu a verificação de possíveis alterações nos parâmetros reológicos das mesmas.

Em termos de tratamento de dados, todas as argamassas passaram por semelhante procedimento. Por opção serão apresentados, de forma pormenorizada, apenas os procedimentos referentes à argamassa de referência.

Pela tabela 4.21 podem ser observados diversos parâmetros reológicos relacionados com a argamassa de referência, com associação binária de finos (Amostra1.FC.0,80). Nesta tabela, observam-se parâmetros da mistura, e também parâmetros reológicos, como a tensão de cedência, associados à respetiva curva de escoamento (figura 4.6), resultante do tratamento de dados obtidos pelo ensaio do reómetro.

Tabela 4.21 - Parâmetros reológicos da argamassa Amostra1.FC.0,80.

Amostra1.FC.0,80							
Designação da argamassa	Parâmetros da mistura			Parâmetros reológicos da argamassa observados			Classificação do material
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Tensão de cedência (τ_0) [Nmm]	Índice de consistência (k)	Fator Não Newtoniano (n)	
Amostra1.FC.0,80	0,80	0,70	0,34	1,451	0,085	1,163	Dilatante

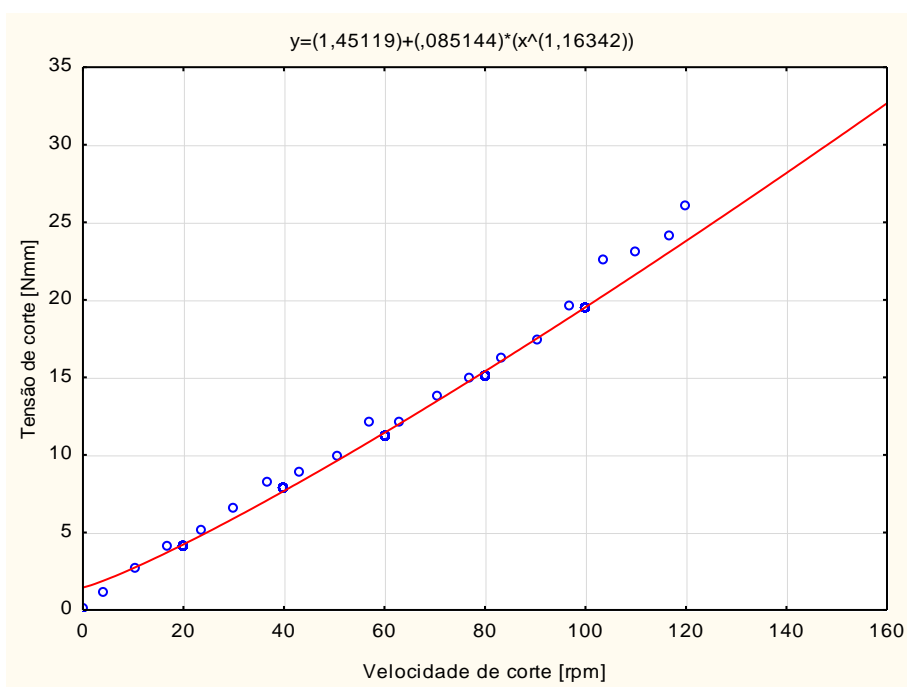


Figura 4.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FC.0,80.

Para além do estudo das curvas de escoamento das argamassas, procedeu-se à análise das curvas de viscosidade. Na figura 4.7 encontra-se ilustrada a curva de viscosidade (indicando-se adicionalmente a quantidade máxima e onde se regista esse mesmo valor da viscosidade) que foi determinada para a argamassa Amostra1.FC.0,80. Por sua vez, na tabela 4.22 é apresentado o valor máximo da viscosidade, e correspondente taxa de deformação, verificado na figura 4.7.

Tabela 4.22 - Valor máximo medido da viscosidade da argamassa Amostra1.FC.0,80.

Amostra1.FC.0,80		
Designação da argamassa	Máxima viscosidade medida [N.mm.rpm]	Taxa de deformação correspondente [rpm]
Amostra1.FC.0,80	3127,9	120

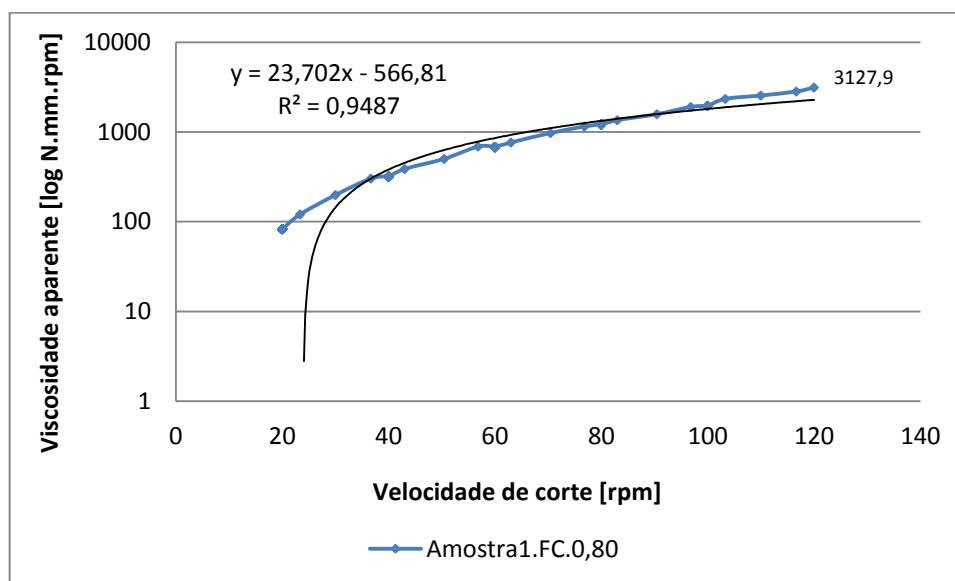


Figura 4.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FC.0,80.

Houve ainda necessidade de se estudar o parâmetro reológico Tixotropia. Na figura 4.8 encontram-se representadas as regiões de tixotropia existentes nas curvas de escoamento, e indicaram-se as quantidades de tixotropia (“área”= torque x velocidade de corte) calculadas (tabela 4.23), relativas à argamassa de referência com associação binária de finos (Amostra1.FC.0,80). Por forma a se obter uma boa percepção da tixotropia presente nas

argamassas, optou-se por diferenciar as duas regiões de tixotropia distintas, tixotrópicas e reopéticas, a cor verde, e a cor vermelho escuro, respetivamente.

Tabela 4.23 - Quantificação da tixotropia da argamassa Amostra1.FC.0,80.

Amostra1.FC.0,80				
Designação da argamassa	Medição das áreas de tixotropia [N.mm.rpm]			Classificação do material
	Tixotrópicas	Reopéticas	Diferencial	
Amostra1.FC.0,80	115,84	5,67	110,17	Tixotrópico

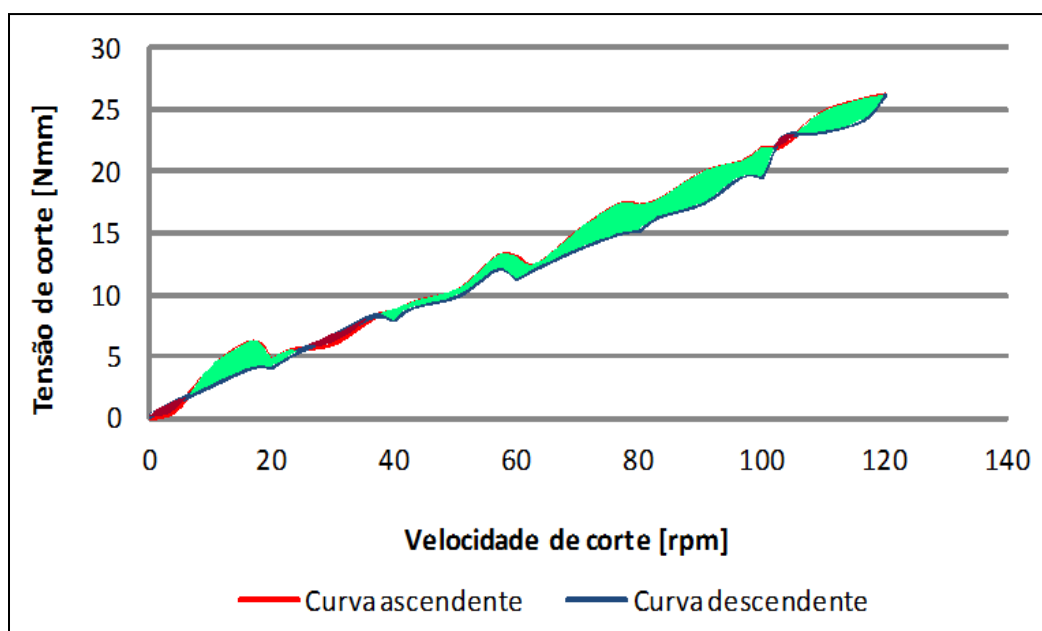


Figura 4.8 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra1.FC.0,80.

De forma a ter-se uma melhor perceção dos resultados globais atingidos pelos ensaios efetuados nas argamassas da Série 1, optou-se por construir uma tabela resumo (tabela 4.24).

Em termos de complemento, são apresentados três anexos, A, B e C. Do Anexo A constam as folhas de cálculo do Excel que foram utilizadas para o cálculo das composições das argamassas (Anexo A.1). O segundo anexo, o Anexo B compreende o estudo do comportamento reológico das argamassas, conjuntamente com as respetivas curvas de escoamento e de viscosidade (Anexos B.1 e B.2), e por fim o Anexo C respeitante ao estudo adicional do parâmetro reológico da tixotropia (Anexos C.1).

Assim, no Anexo A.1 estão integrados os parâmetros de cálculo da composição das 6 argamassas corrigidas da Série 1 que foram produzidas. De lembrar que a Série 1 foi composta por um total de 11 argamassas, no entanto para as restantes 5 argamassas da Série 1 (argamassas com volume de água e de superplastificante de referência) optou-se por não as apresentar por terem como base as mesmas folhas de cálculo utilizadas para a formulação da composição das argamassas corrigidas. Para além dos parâmetros de cálculo, são também aqui apresentados parâmetros considerados importantes para a análise e argumentação dos resultados.

Relativamente aos Anexos B.1 e B.2, respetivamente para as 6 argamassas corrigidas e para as 5 argamassas com volume de água e superplastificante de referência, apresentam-se os resultados decorrentes dos ensaios empíricos das argamassas no estado fresco, e também as curvas de escoamento, e as curvas de viscosidade derivadas do ensaio do reómetro. São ainda indicados os parâmetros das respetivas curvas e por sua vez efetuada a classificação das argamassas.

Já no Anexo C.1 são apresentadas as quantidades calculadas do parâmetro da tixotropia para as 6 argamassas corrigidas. Para além destes valores representa-se ainda, através de uma ilustração de diferentes cores (regiões tixotrópicas e reopéticas da curva de escoamento, a cor verde e vermelho escuro, respetivamente), a evolução da tixotropia nas argamassas compostas por diferentes taxas percentuais de agregado fino reciclado.

Tabela 4.24 - Sumário dos resultados obtidos nas argamassas da Série 1.

		Modelo de Herschel-Bulkeley: $\tau = \tau_0 + K * (\dot{\gamma} \wedge n)$		
Designação da argamassa	Equação	Coeficiente de determinação, R ²	Classificação do material quanto a:	
			Escoamento	Tixotropia
Amostra1.FC,0,80	$y = 1,451 + 0,085 * x^{1,163}$	0,998	Dilatante	Tixotrópico
Amostra2.FC,0,80	$y = 2,073 + 0,189 * x^{1,018}$	0,999	Plástico de Bingham	Tixotrópico
Amostra3.FC,0,80	$y = 10,886 + 1,482 * x^{0,839}$	0,998	Pseudoplástico	Tixotrópico
Amostra4.FC,0,80	$y = 9,092 + 0,475 * x^{1,015}$	0,998	Plástico de Bingham	Tixotrópico
Amostra5.FC,0,80	$y = 8,054 + 0,232 * x^{1,123}$	0,998	Dilatante	Reopético
Amostra6.FC,0,80	$y = 7,271 + 22,386 * x^{0,429}$	0,993	Pseudoplástico	Reopético
Amostra2.FC,0,80.WSpRef	$y = 3,383 + 0,122 * x^{1,19}$	0,999	Dilatante	-
Amostra3.FC,0,80.WSpRef	$y = 5,803 + 0,215 * x^{1,14}$	0,999	Dilatante	-
Amostra4.FC,0,80.WSpRef	$y = 9,919 + 0,295 * x^{1,12}$	0,999	Dilatante	-
Amostra5.FC,0,80.WSpRef	$y = 10,494 + 0,245 * x^{1,184}$	0,998	Dilatante	-
Amostra6.FC,0,80.WSpRef	$y = 6,668 + 0,201 * x^{1,161}$	0,998	Dilatante	-

Nas figuras 4.9 e 4.10 apresentam-se os resultados relativos à variação das dosagens do volume absoluto de água e de superplastificante, respetivamente, das argamassas da Série 1 produzidas, com a introdução sucessiva de uma percentagem fixa (cerca de 10%) de AFR. Em análise à figura 4.XX, respeitante ao volume absoluto de água, registaram-se valores que oscilaram entre os 236,5 litros/m³, para as argamassas de Referência e com 50% de substituição de areia reciclada, e 242,9 litros/m³ para a mistura com 40% de substituição de areia reciclada. Com a incorporação dos agregados finos reciclados, inicialmente, verifica-se

um aumento na quantidade de água utilizada nas argamassas, porém não é um aumento linear, chegando inclusive a argamassa com 50% de areia de substituição a registrar um valor de água igual ao da mistura de referência. Mesmo assim, pode afirmar-se que em média os valores para o volume de água nas argamassas com AFR incorporados são mais elevados comparativamente à argamassa de Referência. Estes resultados podem ser explicados pela elevada percentagem de finos existentes nos AFR, ao contrário dos AFN. Como efeito dessa presença de finos, os AFR possuem elevados valores de absorção do teor em água. Para além deste fato, os AFR com os quais se efetuou a substituição de AFN, possuem formas muito mais irregulares, devendo-se isto à sua natureza, sendo os AFR britados e os AFN rolados.

O aumento das dosagens de volume de água em argamassas de betão com incorporação de agregados reciclados por substituição de agregados naturais, foi anteriormente reconhecido por RANGEL (2010) e BELIN *et al.* (2014), onde nos seus estudos evidenciaram o fato de haver uma grande capacidade de absorção pelos AFR, comparativamente aos AFN.

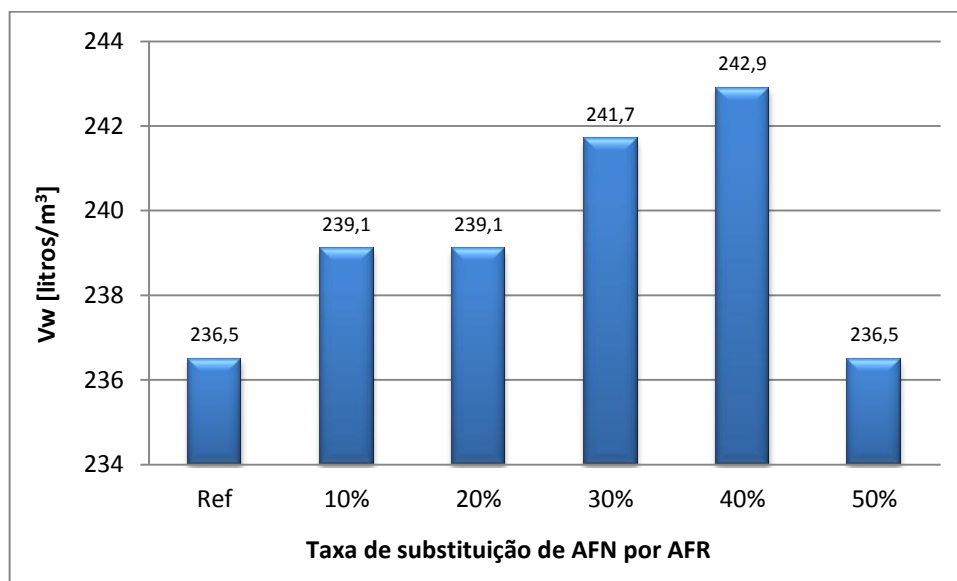


Figura 4.9 - Dosagem de água por metro cúbico das argamassas corrigidas da Série 1.

Relativamente às dosagens de superplastificante, pela análise da figura 4.10, verifica-se que ocorre um abaixamento significativo do seu valor, de 3,16 litros/m³ para os 3,06 litros/m³, aquando da introdução de agregados finos reciclados nas argamassas. No entanto, comparando as argamassas onde estão incluídos AFR regista-se um aumento relativo do volume de superplastificante com o contínuo incremento das taxas de substituição de AFR. Este efeito pode ter a ver com a já referida elevada existência de materiais finos contaminantes nos agregados finos reciclados, e que marcaram presença nas argamassas.

Quanto maior a percentagem de agregados finos reciclados na mistura, maior a percentagem de finos associados.

Da comparação dos dois gráficos ilustrados nas figuras 4.9 e 4.10, dos volumes de água e de superplastificante, respetivamente, pode ainda verificar-se que quando o volume de água nas argamassas é menor, o respetivo volume de superplastificante é maior.

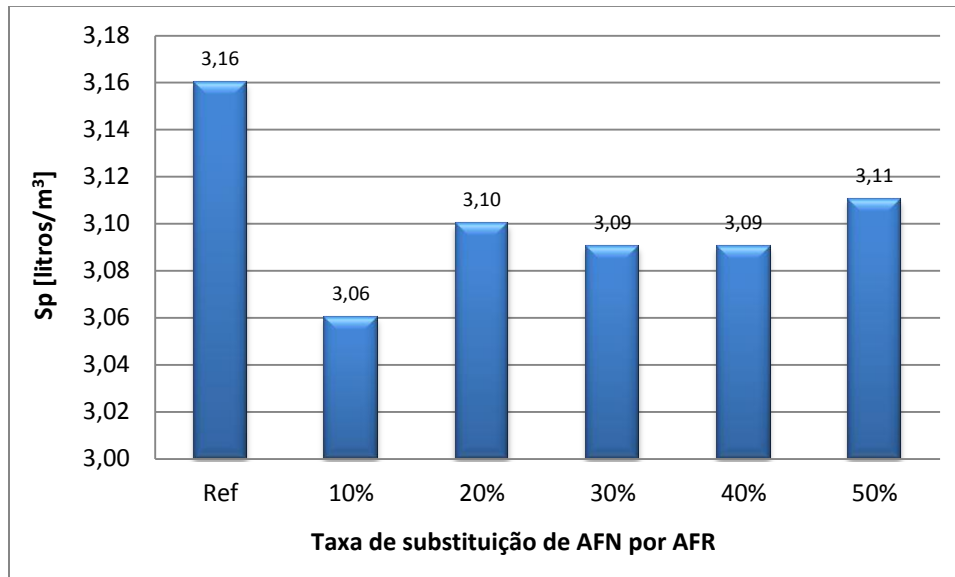


Figura 4.10 - Dosagem de superplastificante por metro cúbico das argamassas corrigidas da Série 1.

Seguidamente, na figura 4.11 apresentam-se e analisam-se os gráficos que relacionam o parâmetro reológico tensão de cedência, com as taxas de substituição de AFN por AFR, para as argamassas corrigidas da Série 1.

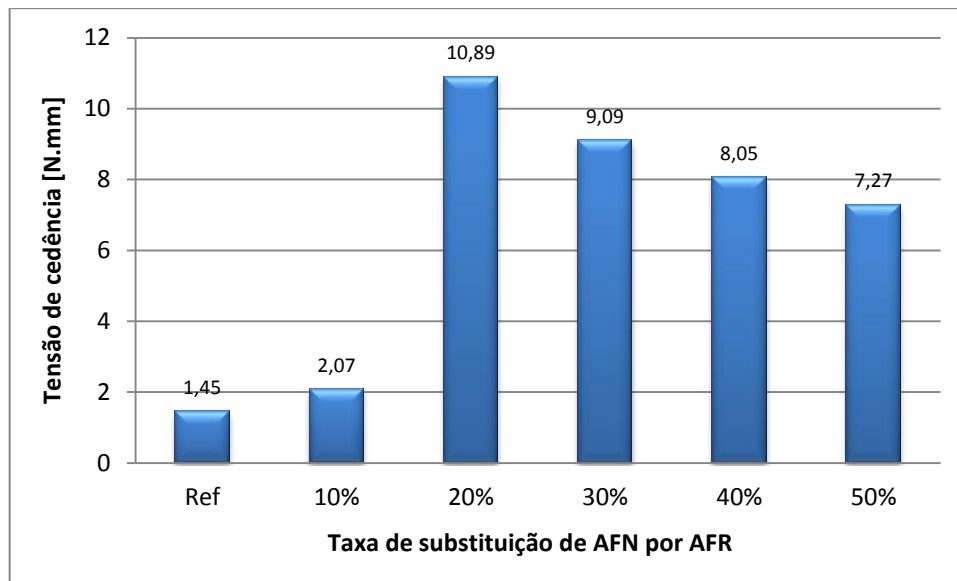


Figura 4.11 - Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 1.

Pela observação da figura 4.11 pode verificar-se que ocorre um aumento médio das tensões de cedência nas argamassas com a incorporação de agregados finos reciclados, comparativamente à argamassa de referência sem AFR. Este aumento não é no entanto linear, ocorrendo um significativo incremento quando da passagem da taxa de substituição de agregado dos 20% para os 30%. Segue-se depois um declínio constante dessa tensão até à taxa limite dos 50% de substituição. A diferença de valores entre a argamassa de referência e as argamassas com agregados reciclados pode estar na maior percentagem de finos existente na argamassa de referência, ou seja, esta possuindo um maior teor de volume de pasta, possui também maior fluidez logo não será necessário uma tensão tão elevada para dar início ao escoamento na mesma. À medida que a taxa de substituição aumenta, aumenta também a percentagem de agregado nas misturas, logo ocorre o abaixamento sucessivo dos teores de pasta. Relativamente ao maior valor de tensão ter sido observado na taxa dos 30%, este poderá ser explicado pelas possíveis variações entre as próprias partículas (forma, percentagem de finos) e também por possível erro humano na altura da produção da argamassa através de um possível retardamento no início do processo do ensaio do reómetro.

Com o objetivo de se entender qual o efeito do agregado fino reciclado sobre o parâmetro da viscosidade nas argamassas da Série 1 foi criado o gráfico que se encontra apresentado na figura 4.12. Pela sua análise pode observar-se que a inclusão de diferentes percentagens de agregado fino reciclado nas argamassas leva a alterações nas respetivas viscosidades. Estas alterações manifestam-se através do aumento médio da viscosidade à medida que a taxa de substituição de AFN por AFR nas argamassas cresce. Em termos de valores da viscosidade, a

argamassa de referência foi a que apresentou o valor mais baixo, cerca de 3127,9 N.mm.rpm, enquanto a argamassa com 50% de taxa de substituição de areia 0/4 apresentou o valor mais elevado, a rondar os 21359 N.mm.rpm. Verificou-se porém que nas argamassas com 20% e 30% de areia reciclada esse aumento da viscosidade não seguiu um crescimento linear. Existem possíveis razões para este fato analisado, tais como erro humano, características das partículas de agregado reciclado (maior área de superfície, rugosidade, etc.), e ainda fatores de interferência entre partículas. A natureza do agregado reciclado, britado, leva a que as partículas possuam formas e dimensões irregulares, e por sua vez, maior área de superfície relativamente aos agregados finos naturais. Para além disto, os agregados finos reciclados contêm elevadas percentagens de finos. Estes diferentes fatores combinados levam a uma perda da fluidez da argamassa, tornando-a mais viscosa.

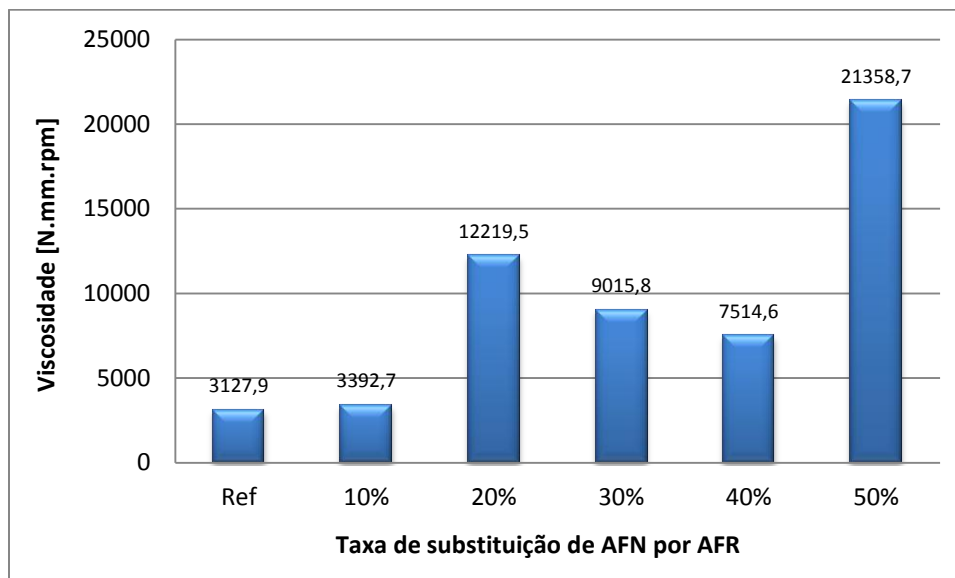


Figura 4.12 - Viscosidade versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 1.

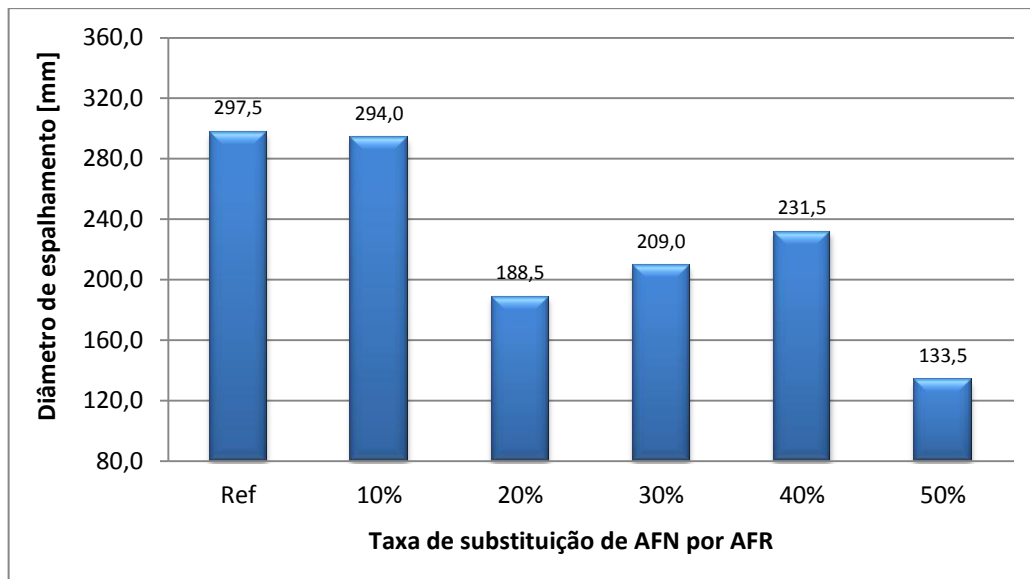


Figura 4.13 - Diâmetro de espalhamento versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 1.

Na figura 4.13 relaciona-se o diâmetro de espalhamento obtido no ensaio empírico de espalhamento do cone, com a taxa de substituição de AFN por AFR. Efetuando uma rápida análise ao gráfico é possível observar que com o aumento da taxa de substituição da areia 0/4 ocorre uma redução do diâmetro de espalhamento das argamassas. Esta redução é tanto maior quanto maior for a taxa de agregado reciclado incluído na argamassa, verificando-se isto com o valor de 297,5 mm de espalhamento para a argamassa de referência e um valor de espalhamento igual a 133,5 mm para a argamassa com taxa de substituição de 50%. Uma maior quantidade de materiais britados, com formas irregulares e elevada área de superfície específica, e também a redução do teor de pasta, levam a maiores valores da tensão de cedência e da viscosidade plástica, como averiguou WESTERHOLM (2006). Tal constatação corrobora a tendência observada para a viscosidade relativa ou coeficiente de consistência, discutido anteriormente.

De seguida, é feita uma abordagem ao parâmetro reológico da tixotropia. Na figura 4.14 estão relacionadas as áreas de tixotropia das curvas de escoamento das argamassas corrigidas da Série 1, com a taxa de substituição de AFN por AFR. Nas curvas foram verificadas dois tipos de regiões distintas (região tixotrópica e região reopética). Pode-se afirmar pelo gráfico que, conforme ocorre a subida para um patamar superior da taxa de substituição, existe uma perda das regiões tixotrópicas comparativamente às regiões reopéticas. Isto significa que um material inicialmente tixotrópico adquire características reopéticas quando na sua constituição possui maiores percentagens de areia reciclada (40% e 50% de taxa de substituição). Na argamassa com 50% de AFR o valor da tixotropia atingiu um valor bastante elevado, 3081,95

N.mm.rpm, o qual se explica pela elevada viscosidade da respetiva argamassa (apresentada na figura 4.12).

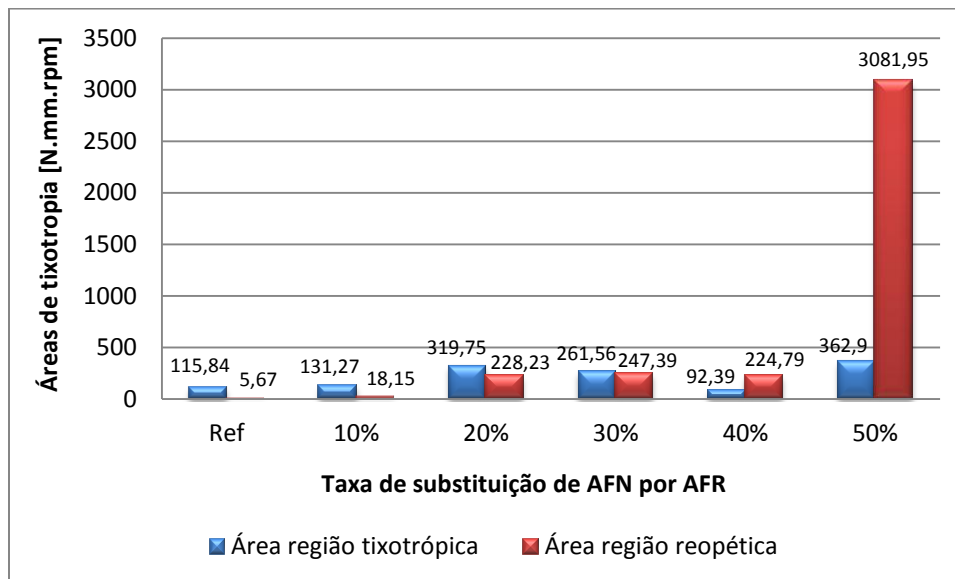


Figura 4.14 - Áreas de tixotropia versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 1.

4.3.3.3. Argamassas de associação ternária (Série 2)

Relativamente às argamassas da Série 2, como já fora abordado no Capítulo 3, foi decidido utilizar uma nova adição na mistura de referência da argamassa binária, a cinza volante, após verificações efetuadas por NEPOMUCENO (2005). Pretendia-se com este componente extra tirar vantagens da existência de uma elevada percentagem de hidróxido de cálcio nos agregados finos reciclados. Assim, produziu-se uma segunda série de argamassas, dita ternária, com um total de 11 argamassas, onde se incluiu uma argamassa de referência, sem agregado fino reciclado. Estas 11 argamassas contaram com uma composição reformulada, em comparação com as argamassas da Série 1, onde se evidenciava uma igual percentagem de cimento Portland CEM I 42,5R (cerca de 40%), e diferentes percentagens de fíler calcário e cinza volante na ordem dos 50% e 10%, respetivamente. A adição da percentagem de cinza volante ocorreu em detrimento de igual percentagem de fíler calcário. A Série 2 de argamassas sofreu o mesmo processo de produção que as argamassas da Série 1, efetuando-se a substituição sucessiva e gradual da areia natural 0/4 em patamares, dos 10% até ao limite de 50%, por areia reciclada, com base na argamassa de referência. Importa referir que das 11 argamassas da Série 2, uma argamassa era de referência, e as restantes 10 argamassas, assim

como aconteceu na Série 1, 5 possuíam volumes de água e de superplastificante corrigidos, e as restantes 5 continham volume de água e de superplastificante originais, ou seja, valores para volume de água e superplastificante iguais aos da argamassa de referência ternária.

Quanto ao procedimento de tratamento de dados, este foi similar ao adotado para as argamassas da Série 1, binárias. Tornou-se assim dispensável a realização de um esclarecimento detalhado do mesmo.

Para se ter uma melhor percepção dos resultados globais atingidos pelos ensaios efetuados nas argamassas da Série 2, optou-se, assim como já se tinha efetuado para a Série 1, por construir uma tabela resumo (tabela 4.25).

Em termos de complemento, são apresentados três anexos, A, B e C. Do Anexo A constam as folhas de cálculo do Excel que foram utilizadas para o cálculo das composições das argamassas (Anexo A.2). O segundo anexo, o Anexo B compreende o estudo do comportamento reológico das argamassas, conjuntamente com as respetivas curvas de escoamento e de viscosidade (Anexos B.3 e B.4), e por fim o Anexo C respeitante ao estudo adicional do parâmetro reológico da tixotropia (Anexo C.2).

Assim, no Anexo A.2 estão integrados os parâmetros de cálculo da composição das 6 argamassas corrigidas da Série 2 que foram produzidas. De lembrar que a Série 2 foi composta por um total de 11 argamassas, no entanto para as restantes 5 argamassas da Série 2 (argamassas com volume de água e de superplastificante de referência) optou-se por não as apresentar por terem como base as mesmas folhas de cálculo utilizadas para a formulação da composição das argamassas corrigidas. Para além dos parâmetros de cálculo, são também aqui apresentados parâmetros considerados importantes para a análise e argumentação dos resultados.

Relativamente aos Anexos B.3 e B.4, respetivamente para as 6 argamassas corrigidas e para as 5 argamassas com volume de água e superplastificante de referência, apresentam-se os resultados decorrentes dos ensaios empíricos das argamassas no estado fresco, e também as curvas de escoamento, e as curvas de viscosidade derivadas do ensaio do reómetro. São ainda indicados os parâmetros das respetivas curvas e por sua vez efetuada a classificação das argamassas.

Já no Anexo C.2 são apresentadas as quantidades calculadas do parâmetro da tixotropia para as 6 argamassas corrigidas. Para além destes valores representa-se ainda, através de uma ilustração de diferentes cores (regiões tixotrópicas e reopéticas da curva de escoamento, a cor verde e vermelho escuro, respetivamente), a evolução da tixotropia nas argamassas compostas por diferentes taxas percentuais de agregado fino reciclado.

Tabela 4.25 - Sumário dos resultados obtidos nas argamassas da Série 2.

Modelo de Herschel-Bulkley: $T = T_0 + K * (V \wedge n)$						
Designação da argamassa	Equação	Coeficiente de determinação, R ²	Classificação do material quanto a:			
			Escoamento	Tixotropia		
Amostra1.FCCV.0,80	$Y = 1,373 + 0,009 * X^{1,376}$	0,998	Dilatante	Tixotrópico		
Amostra2.FCCV.0,80	$Y = 2,132 + 0,085 * X^{1,183}$	0,999	Dilatante	Tixotrópico		
Amostra3.FCCV.0,80	$Y = 1,736 + 0,031 * X^{1,314}$	0,998	Dilatante	Tixotrópico		
Amostra4.FCCV.0,80	$Y = 3,499 + 0,061 * X^{1,311}$	0,999	Dilatante	Tixotrópico		
Amostra5.FCCV.0,80	$Y = 3,741 + 0,113 * X^{1,234}$	0,999	Dilatante	Tixotrópico		
Amostra6.FCCV.0,80	$Y = 13,615 + 0,238 * X^{1,188}$	0,997	Dilatante	Tixotrópico		
Amostra2.FCCV.0,80.WSPRef	$Y = 1,558 + 0,03 * X^{1,25}$	0,999	Dilatante	-		
Amostra3.FCCV.0,80.WSPRef	$Y = 1,833 + 0,002 * X^{1,803}$	0,967	Dilatante	-		
Amostra4.FCCV.0,80.WSPRef	$Y = 2,207 + 0,031 * X^{1,301}$	0,999	Dilatante	-		
Amostra5.FCCV.0,80.WSPRef	$Y = 2,80 + 0,083 * X^{1,145}$	0,998	Dilatante	-		
Amostra6.FCCV.0,80.WSPRef	$Y = 2,504 + 0,052 * X^{1,249}$	0,999	Dilatante	-		

Seguidamente apresenta-se a variação das dosagens em volume absoluto de água e de superplastificante para cada uma das argamassas da Série 2 produzidas, ilustradas respetivamente nas figuras 4.15 e 4.16.

Analisando o gráfico presente na figura 4.15, pode observar-se que o volume de água das argamassas varia no intervalo de 250,4 litros/m³, da argamassa de referência, e os 244,1 litros/m³, das argamassas com 40% e 50% de taxa de substituição de areia reciclada. A

variação do volume de água das argamassas ocorreu na forma de um decréscimo contínuo consoante foi sendo verificado o aumento das percentagens de AFR nas misturas.

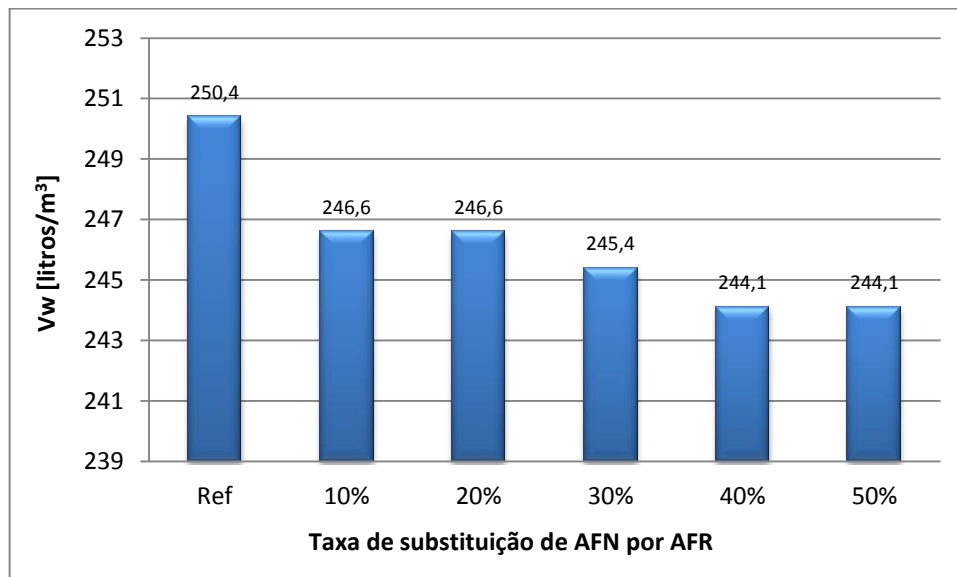


Figura 4.15 - Dosagem de água por metro cúbico das argamassas corrigidas da Série 2.

Pela análise da figura 4.16, relativa ao volume de superplastificante presente nas argamassas da Série 2, verifica-se que, com o aumento das taxas de substituição de areia natural 0/4 por areia reciclada, ocorre também um incremento não muito elevado do volume de superplastificante. A argamassa de referência apresentou o valor mais baixo, cerca de 3,47 litros/m³ enquanto as argamassas com cerca de 40% e 50% de AFR incorporados registaram valores na ordem dos 3,54 litros/m³.

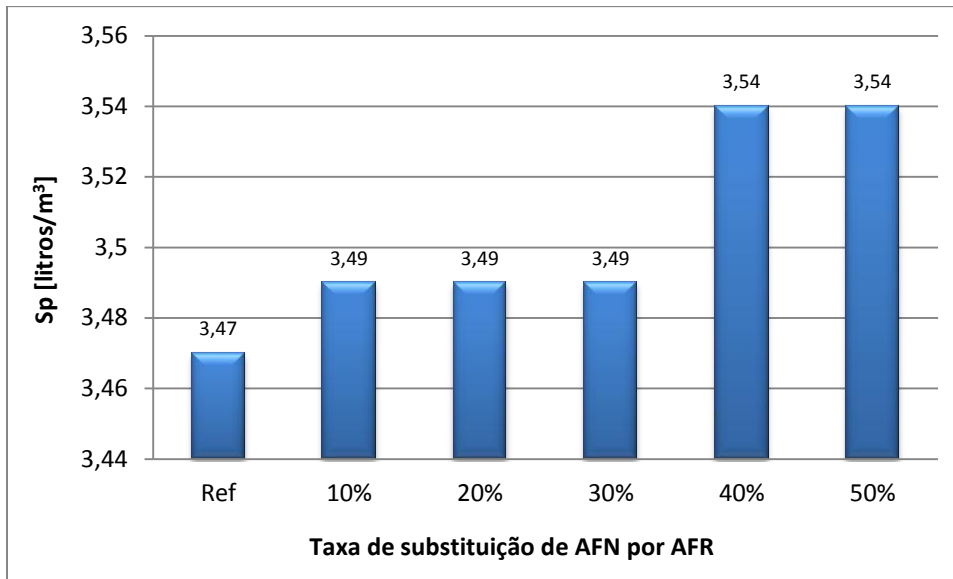


Figura 4.16 - Dosagem de superplastificante por metro cúbico das argamassas corrigidas da Série 2.

Ainda com o intuito de se entender a influência da inclusão de diferentes percentagens de agregados finos reciclados por substituição dos agregados finos naturais nas misturas, apresenta-se e efetua-se uma análise à figura 4.17, a qual indica a variação do parâmetro tensão de cedência com as diferentes taxas de substituição.

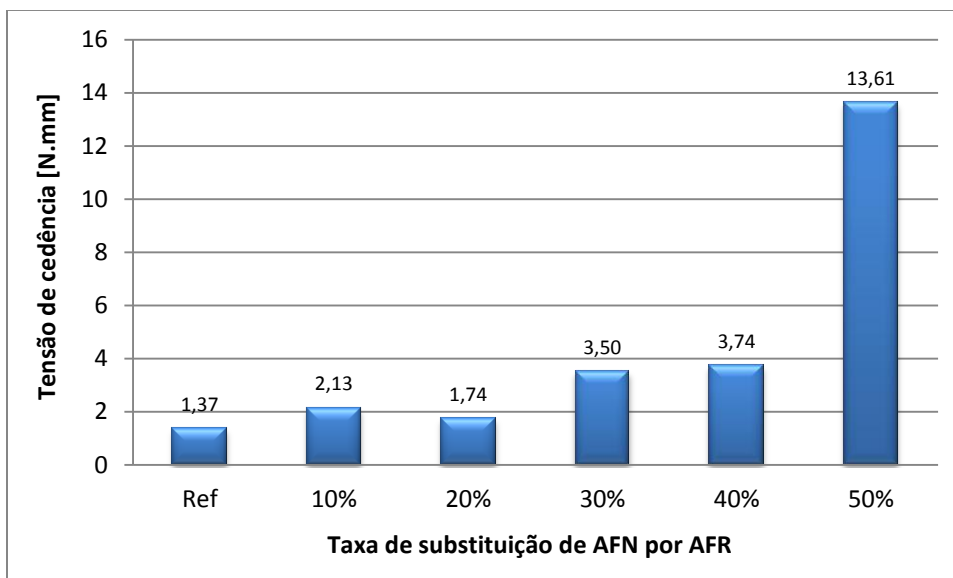


Figura 4.17 - Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 2.

Analisando a figura 4.17 regista-se um incremento sucessivo das tensões de cedência com o aumento das taxas de substituição de agregado fino natural por agregado fino reciclado. Os valores para a tensão de cedência variaram entre os 1,37 N.mm da argamassa de referência e os 13,61 N.mm registados na argamassa com 50% de taxa de substituição. Como já foi referido na análise das tensões de cedência das argamassas corrigidas da Série 1, os aspetos que se julgam poder estar por detrás desta evolução de valores são a redução contínua dos teores de volume de pasta, que acontece com o aumento das taxas de substituição da areia natural 0/4 por areia reciclada. A redução na fluidez das argamassas leva a um aumento das respetivas tensões de cedência.

Quanto à relação da viscosidade com as diferentes taxas de substituição de AFN por AFR, esta é observada claramente pela figura 4.18. Verifica-se a ocorrência de um incremento praticamente sucessivo dos valores da viscosidade das argamassas da Série 2, com o incremento gradual e sucessivo das taxas de substituição. Observa-se um valor máximo da viscosidade a rondar os 10687 N.mm.rpm, enquanto o valor mais baixo fica-se apenas pelos 1014,8 N.mm.rpm. Esta diferença verificada entre as viscosidades da argamassa de referência e as restantes com incorporação de agregados finos reciclados deve-se às mesmas razões apresentadas aquando da análise das viscosidades com a taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 1.

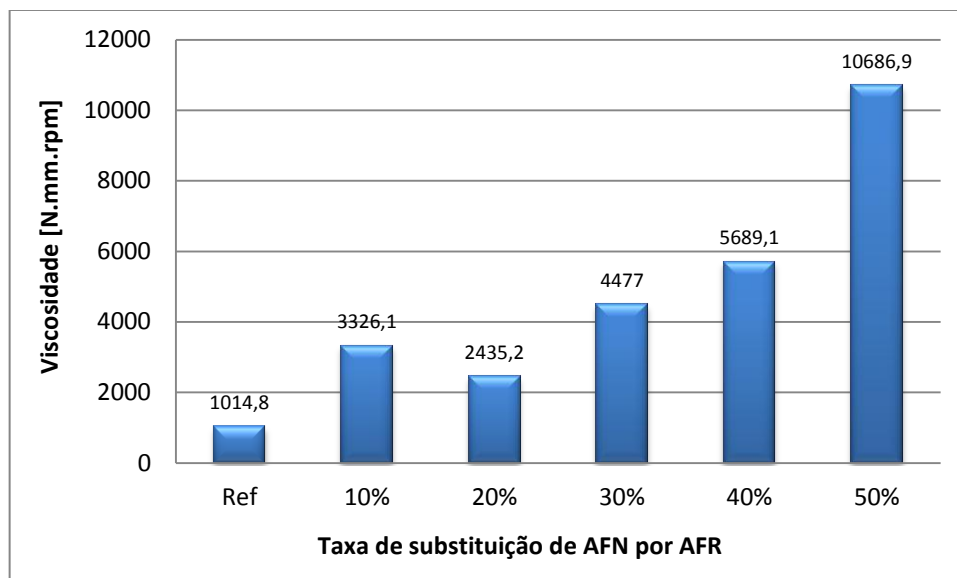


Figura 4.18 - Viscosidade versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 2.

Em seguida, na figura 4.19, é apresentada a evolução dos diâmetros de espalhamento obtidos no ensaio empírico do espalhamento do cone, com a taxa de substituição de AFN por AFR, das argamassas corrigidas da Série 2.

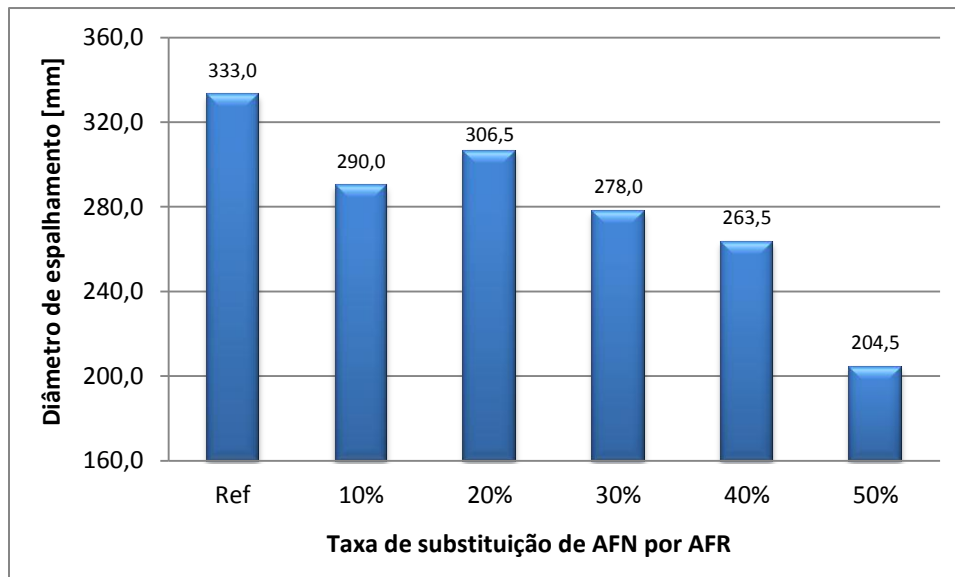


Figura 4.19 - Diâmetro de espalhamento versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 2.

Pela análise da figura 4.19, representativa da variação dos diâmetros de espalhamento versus taxa de substituição de areia natural por reciclada, pode verificar-se que a crescente percentagem na taxa de substituição da areia 0/4 tem o efeito de reduzir o respetivo valor dos diâmetros de espalhamento. Inicialmente registava-se um valor de 333,0 mm, até que se atingiu o valor de 204,5 mm de diâmetro na argamassa com 50% de substituição da areia 0/4. Esta diminuição dos valores foi sequencial, portanto existe uma relação direta entre estes dois parâmetros, onde uma maior percentagem de agregado fino reciclado nas argamassas origina valores mais reduzidos dos diâmetros de espalhamento. As razões para este efeito foram já comentadas no ponto 4.3.3.2, referente às argamassas binárias (Série 1).

Seguidamente, na figura 4.20, é feita referência ao parâmetro da tixotropia das argamassas. Após análise, verifica-se um aumento tanto das áreas tixotrópicas como das reopéticas, aquando do incremento percentual de AFR nas respetivas argamassas. No entanto, nestas misturas ternárias o incremento das áreas tixotrópicas é sempre superior comparado com o das áreas das regiões reopéticas. Quer isto dizer que mesmo com a adição de diferentes percentagens de agregado fino reciclado, as argamassas com cinza volante nunca perdem as

suas características tixotrópicas, ao contrário do que acontece nas argamassas da Série 1, que a partir da percentagem de 40% de taxa de substituição se tornaram reopéticas.

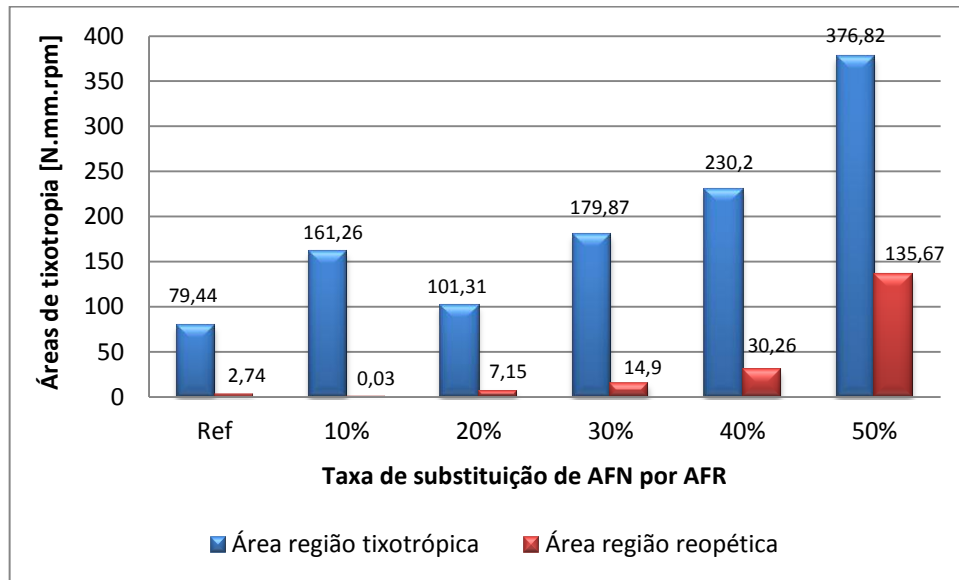


Figura 4.20 - Áreas de tixotropia versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas corrigidas da Série 2.

4.3.3.4. Análise comparativa entre as argamassas corrigidas binárias e ternárias

Inicialmente, neste ponto, representaram-se os gráficos comparativos, da variação da dosagem do volume de água (figura 4.21) e superplastificante (figura 4.22), entre argamassas da Série 1 (binárias) e argamassas da Série 2 (ternárias), com a adição de percentagens sucessivas de agregado fino reciclado.

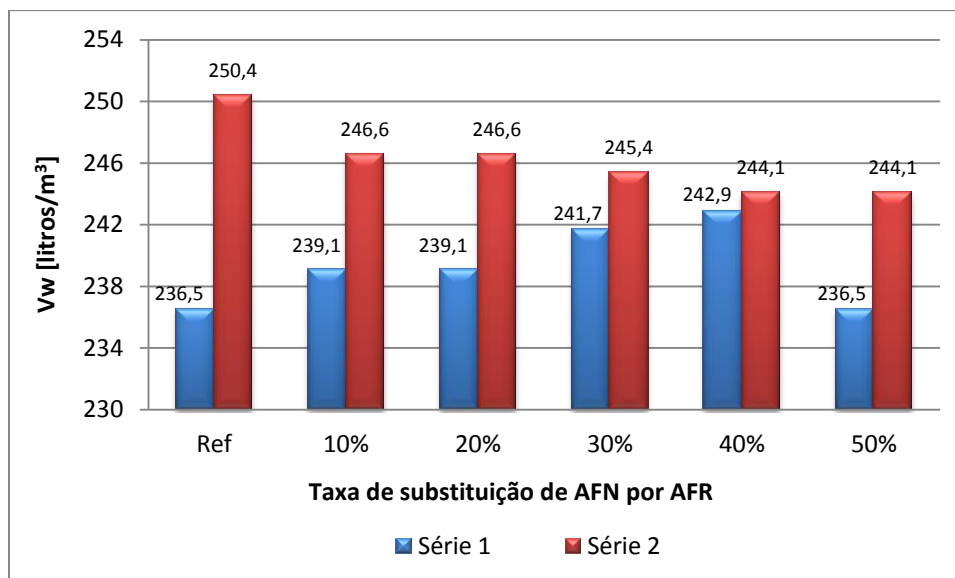


Figura 4.21 - Comparação da dosagem de água por metro cúbico entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2.

Efetuada uma análise à figura 4.21 e comparando ambos os tipos de argamassas, pode verificar-se que em todas as argamassas ternárias (Série 2) o volume absoluto de água foi sempre superior ao do registado nas argamassas da Série 1. A explicação para esta superioridade ao nível do volume de água nas misturas ternárias parece ter a ver com as características das cinzas volantes (partículas esféricas), as quais segundo as Guidelines Europeias para o BAC (2005) induzem o aumento da coesão, aumentando a consistência do betão.

Na figura 4.21 também é possível denotar que ocorreu entre as argamassas das duas séries um processo inverso com o incremento das taxas percentuais de areia reciclada nas argamassas, ou seja, enquanto a dosagem de água das argamassas ternárias sofreu um decréscimo com o aumento da percentagem de AFR incorporado, nas argamassas binárias ocorreu um aumento dessa mesma dosagem de água de amassadura. Este processo apenas não aconteceu na argamassa binária com 50% de areia reciclada incorporada. O fato de haver uma redução no volume de água das argamassas ternárias, com o incremento da percentagem de AFR, não se explica pelo aumento da área da superfície específica da mistura, o que é incoerente. Na verdade o efeito da esfericidade das partículas de cinza volante combinado com a ação do superplastificante resultou na necessidade de menor quantidade de água.

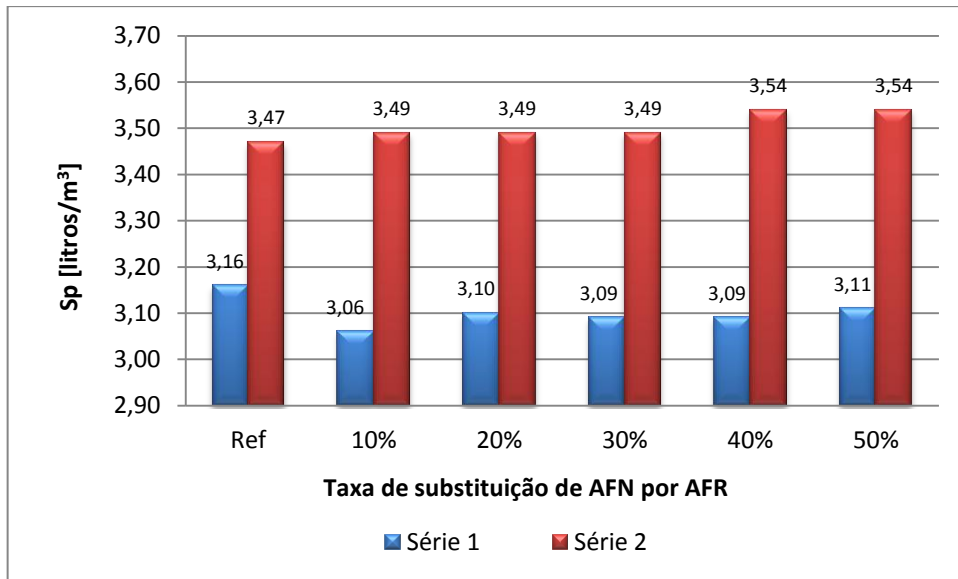


Figura 4.22 - Comparação da dosagem de superplastificante por metro cúbico entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2.

Abordando agora a figura 4.22, pode observar-se claramente que os níveis volumétricos de superplastificante são sempre superiores nas argamassas ternárias, independentemente da percentagem de agregados finos reciclados presentes na sua constituição. Esta diferença pode dever-se à presença das cinzas volantes, através de uma possível adsorção de moléculas, de água ou superplastificante, na superfície das suas partículas. Como referia NEPOMUCENO (2005) pode recorrer-se a uma maior quantidade de superplastificante para reduzir significativamente a dosagem de água de amassadura, o que melhora a fluidez da argamassa através da modificação das forças de superfície entre partículas, evitando assim a segregação do cimento.

Verifica-se também que em ambas as misturas os valores de cada uma das respectivas argamassas se manteve relativamente estável, com valores do volume absoluto de água aproximados.

Para efeitos de análise de um parâmetro reológico, mais precisamente da tensão de cedência, na figura 4.23 efetuou-se a comparação entre as argamassas corrigidas, de ambas as Séries produzidas.

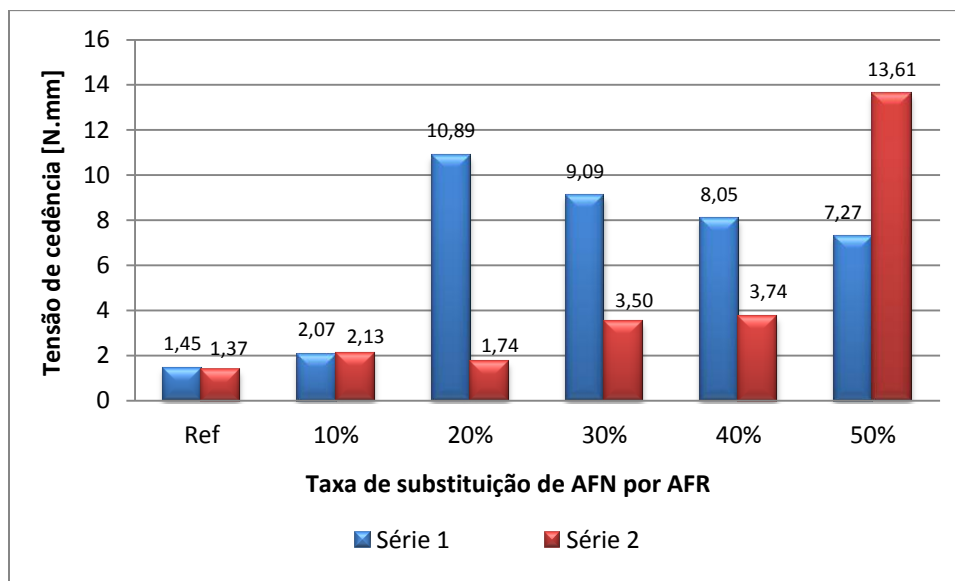


Figura 4.23 - Comparação da tensão de cedência com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2.

Observando o gráfico da figura 4.23 pode afirmar-se que o crescente incremento de agregado fino reciclado na composição das argamassas leva a um aumento médio nas tensões de cedência das argamassas. No entanto não se denota uma correlação na forma como esse aumento da tensão acontece nos dois tipos de argamassas, com as crescentes taxas de substituição do agregado natural por areia reciclada. Por exemplo, nas misturas da Série 1 observa-se um grande aumento da tensão quando é substituída cerca de 20% da areia natural, mas após essa percentagem regista-se uma diminuição do valor das tensões de cedência, até ao limite de substituição dos 50%. Já nas misturas da Série 2, o aumento das tensões é crescente e sucessivo até ao limite dos 50% de taxa de substituição. Em termos de valor máximo da tensão de cedência, o mais elevado (13,61 N.mm) observa-se na argamassa ternária com 50% de substituição AFN por AFR, mas no entanto, em termos médios, os valores da tensão de cedência são mais elevados nas misturas binárias. O fato das argamassas da Série 2 apresentarem valores mais baixos de tensão de cedência parece ter a ver com as propriedades fluidificantes das cinzas volantes integradas nesta série, e já referidas ao longo desta dissertação. Porém o valor mais elevado e registado na argamassa com 50% de substituição da Série 2 parece ser um pouco exagerado, havendo a possibilidade de erro humano, com a demora na realização do ensaio do reómetro após a produção da respetiva argamassa.

Para efeitos de análise do parâmetro reológico da viscosidade apresentam-se na figura 4.24 os valores da viscosidade das argamassas corrigidas das Séries 1 e 2, com a taxa de substituição de AFN por AFR. Efetuando uma comparação entre a evolução da viscosidade em ambas as

séries é possível verificar que nas argamassas da Série 1 ocorre um aumento mais abrupto das viscosidades com a taxa de substituição crescente (motivo já enunciado anteriormente), relativamente às argamassas da Série 2 que apresentam uma tendência suave de aumento. É possível observar também que os valores representativos da viscosidade das argamassas corrigidas da Série 1 são sempre mais elevados que os da Série 2. Os valores mais reduzidos da viscosidade nas argamassas da Série 2 são explicados pela presença das cinzas volantes nas misturas ternárias, as quais possuem características fluidificantes, já referidas anteriormente, compensando a falta de fluidez originada pelo abaixamento dos valores do teor de volume de pasta nas argamassas, derivado da crescente percentagem de incorporação de agregados finos reciclados.

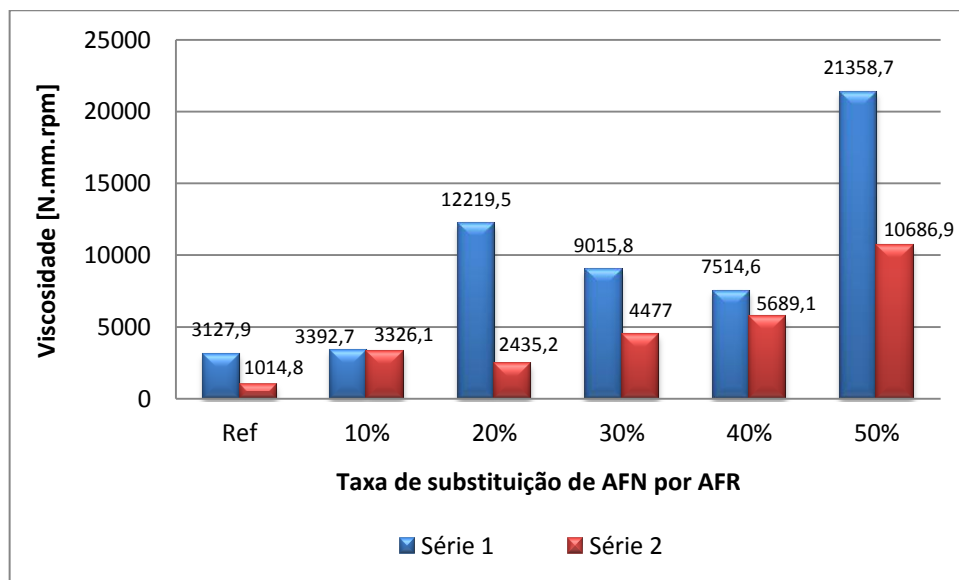


Figura 4.24 - Comparação da viscosidade com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2.

De forma a averiguar a influência de diferentes taxas de substituição de AFN por AFR nos diâmetros de espalhamento, obtidos através do ensaio de espalhamento, das argamassas das Séries 1 e 2, efetuou-se a representação dum gráfico comparativo na figura 4.25.

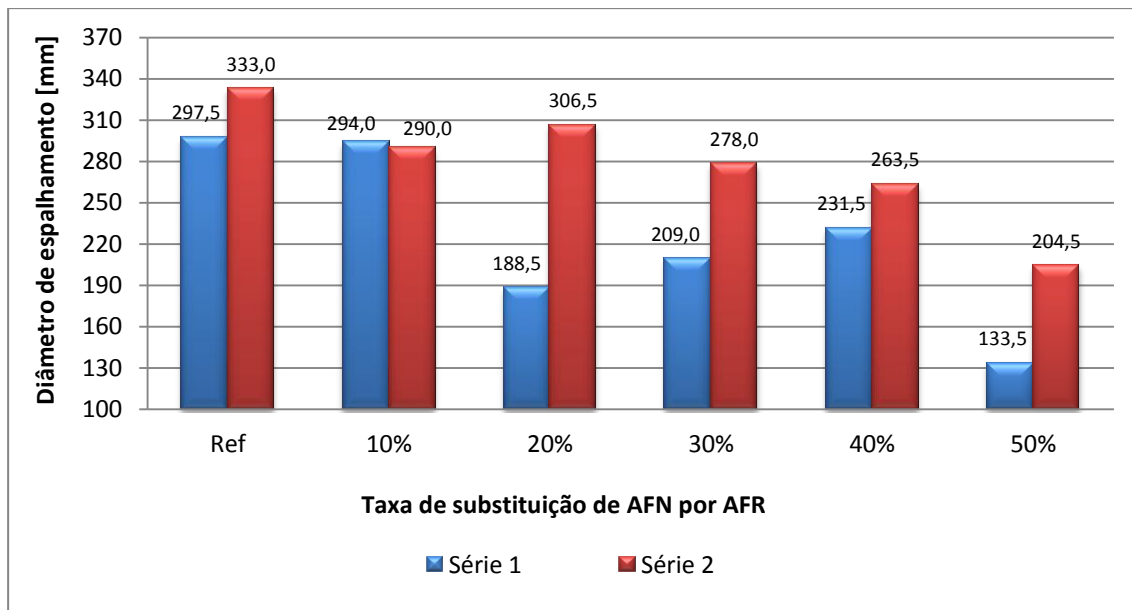


Figura 4.25 - Comparação do diâmetro de espalhamento com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas das Séries 1 e 2.

Efetuada uma análise da figura 4.25 é visível uma diminuição sucessiva e gradual dos valores dos diâmetros de espalhamento, com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFR. Daqui resulta que quanto maior for a percentagem de agregado fino reciclado presente numa argamassa, menor é o diâmetro de espalhamento correspondente. No entanto quando é efetuada uma comparação das diferentes séries observa-se que os valores respeitantes ao diâmetro de espalhamento das argamassas da Série 2 são sempre mais elevados que os das argamassas da Série 1. Este fato deve-se à maior fluidez que se verifica nas argamassas ternárias (Série 2) devido ao efeito já conhecido da interação das cinzas volantes com os restantes componentes das argamassas.

4.3.3.5. Tensão de cedência das argamassas originais (Séries 1 e 2)

A figura 4.26 representa a evolução das tensões de cedência com as diferentes taxas de substituição de AFN por AFR das argamassas originais da Série 1. Da análise do gráfico é verificado que a incorporação de agregados finos reciclados afeta a tensão de cedência através de um incremento médio dos valores das respetivas tensões das argamassas. Apesar de ocorrer o aumento da tensão de cedência das argamassas com AFR comparativamente à argamassa de referência sem AFR, este aumento não acontece de forma linear. Nas argamassas com 30% e 40% de taxa de substituição apresentam valores mais elevados

relativamente ao valor médio, com cerca de 9,92 N.mm e 10,49 N.mm, respetivamente, sendo estes valores mais elevados do que o registado na argamassa com a maior percentagem, 50%, de agregado fino reciclado (cerca de 6,67 N.mm). A explicação para os valores obtidos nas taxas de 30% e 40% aparenta estar nas características do agregado fino reciclado, com formas mais irregulares, de maior rugosidade, e com áreas de superfície superiores comparativamente aos agregados finos naturais. Algumas das características físicas dos AFR, como a rugosidade e o formato irregular das partículas, propiciam efeitos de interferência entre os diferentes agregados componentes das argamassas. Este efeito de interferência foi relatado por ALEXANDER e MINDESS (2005). Identifica-se como um limite de interferência o percentual de 40%, a partir do qual o valor diminui consideravelmente.

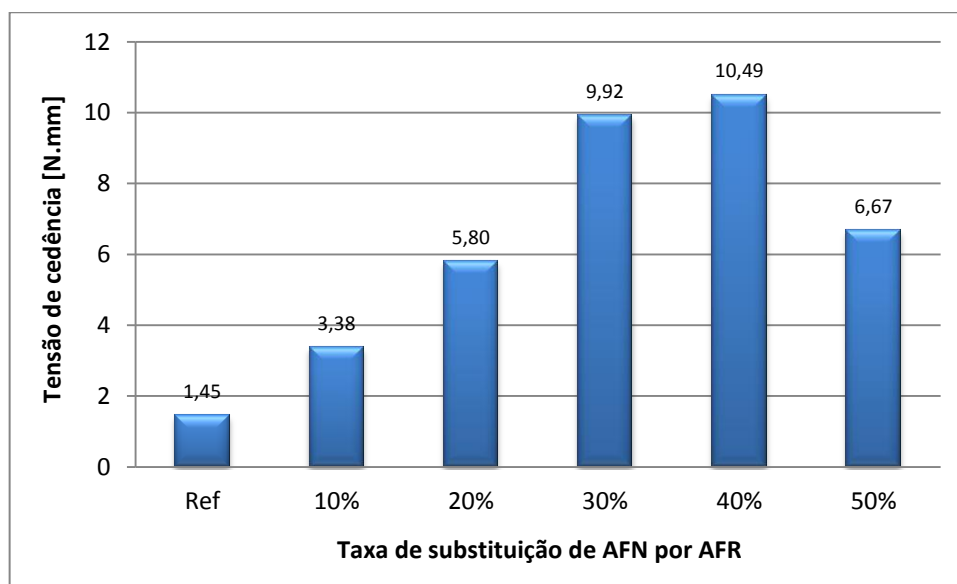


Figura 4.26 - Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas originais da Série 1.

Na figura 4.27 apresentam-se os registos dos valores das tensões de cedência com a taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas originais da Série 2. Efetuando uma análise é possível observar que os valores da tensão de cedência crescem com o aumento da percentagem da taxa de substituição. De notar também que para estas argamassas ternárias, contendo volumes de água de referência, os resultados da tensão são relativamente baixos, entre os 1,37 N.mm da argamassa de referência e os 2,8 N.mm da argamassa com 40% de substituição de areia 0/4. Estes valores reduzidos devem-se à presença da cinza volante, com suas características fluidificantes e também ao maior volume de água, dito de referência, nas argamassas.

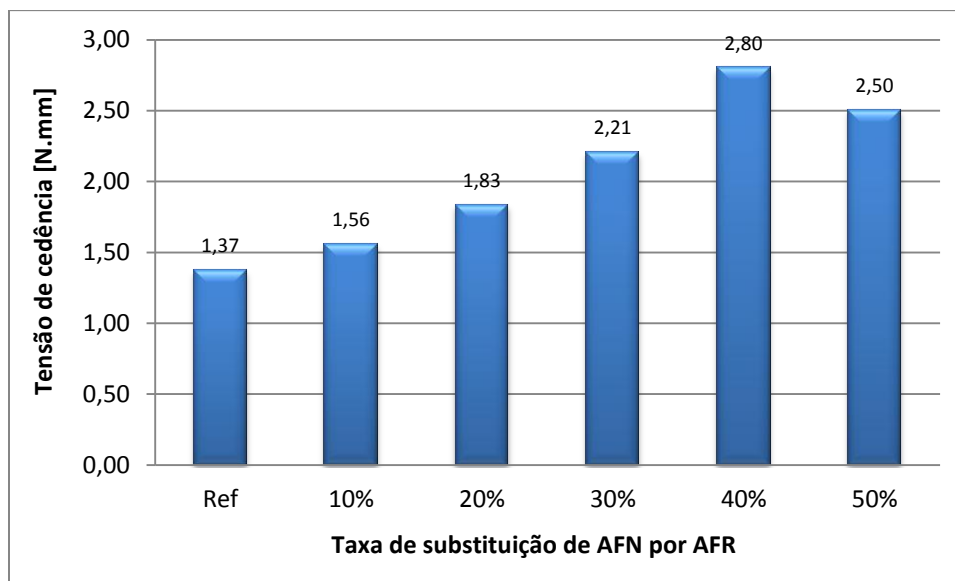


Figura 4.27 - Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas originais da Série 2.

4.3.3.6. Análise comparativa entre as argamassas corrigidas e originais

Com o objetivo de se efetuar uma comparação entre as tensões de cedência com diferentes taxas de substituição de areia natural 0/4, entre argamassas corrigidas e originais da Série 1, apresentou-se a figura 4.28. Pela análise do gráfico é possível observar o incremento médio das tensões de cedência com as crescentes taxas de substituição de AFN por AFR. No entanto são observados alguns valores elevados e talvez desproporcionados relativamente aos demais. Na passagem da taxa de substituição dos 10% para os 20%, da argamassa corrigida da Série 1, observa-se um aumento abrupto, sendo registado um valor de tensão de cedência de 10,89 N.mm. Este valor pode ser explicado por um possível erro humano no momento da realização dos ensaios, com a demora na execução dos mesmos. Relativamente às argamassas com 30% e 40% de substituição de AFN, com valores de tensão superiores comparativamente às argamassas com diferentes percentagens de substituição, estas parecem sofrer do efeito de interferência entre partículas de agregado reciclado, sendo estas mais rugosas, com partículas de formato irregular e apresentando áreas de superfície maiores do que as revistas nos agregados naturais. O limite do efeito de interferência parece terminar na taxa de substituição dos 40%, apresentando as argamassas com 50% de taxa de substituição valores mais razoáveis para as tensões de cedência.

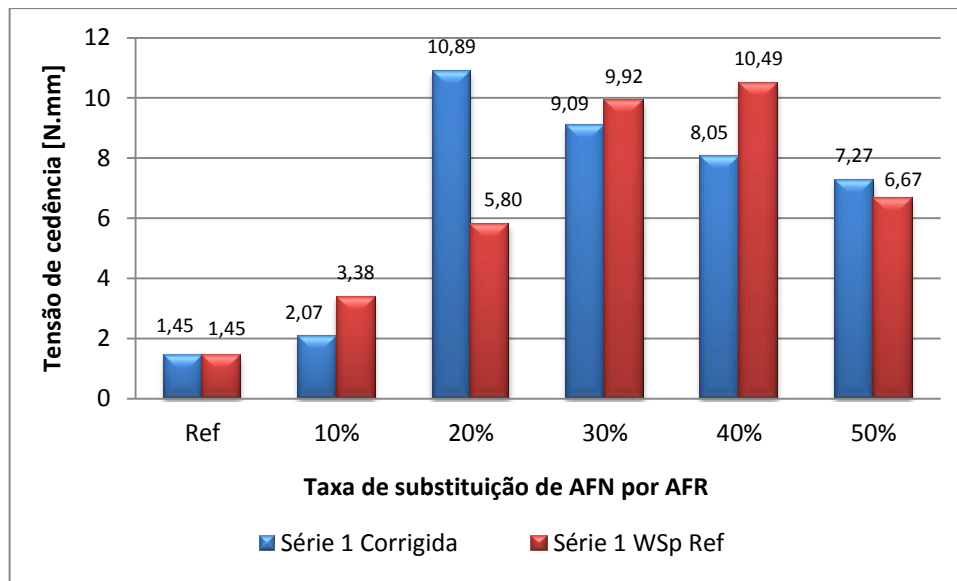


Figura 4.28 - Comparação da tensão de cedência com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas e originais da Série 1.

A mesma comparação foi realizada para as argamassas da Série 2. Pela análise dos resultados apresentados na figura 4.29 é possível verificar que assim como ocorria o aumento da tensão média de cedência para as argamassas da Série 1, também ocorre para estas argamassas da Série 2. Observa-se também que os valores da tensão de cedência das argamassas das Séries 1 e 2 são muito parecidos, tirando a argamassa da Série 2 corrigida, com 50% de taxa de substituição de areia 0/4, que apresenta um valor de 13,61 N.mm muito superior às restantes argamassas. Este valor pode ser explicado por diversos fatores já enunciados anteriormente, como as características das partículas do agregado fino reciclado (maior rugosidade, dimensões diferentes e formas mais irregulares, induzindo efeitos de interferência entre as partículas componentes da argamassa).

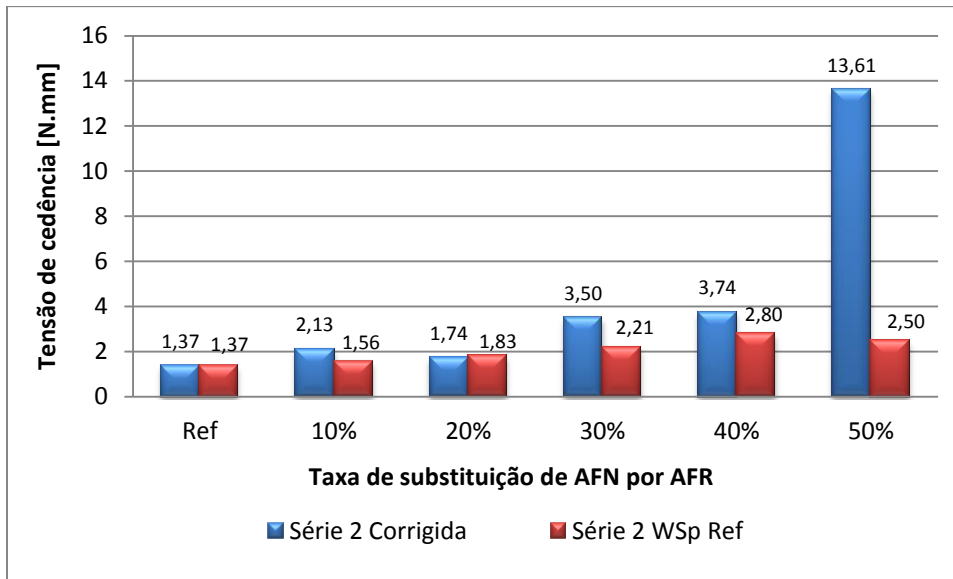


Figura 4.29 - Comparação da tensão de cedência com a taxa de substituição de AFN por AFR entre as argamassas corrigidas e originais da Série 2.

4.3.3.7. Correlação dos parâmetros reológicos das argamassas com o escoamento

4.3.3.7.1. Tensão de cedência versus Diâmetro de espalhamento

As correlações entre as tensões de cedência e o diâmetro de espalhamento obtidos no estudo reológico das argamassas (Série 1 e Série 2) foram traçadas e apresentam-se nas figuras 4.30 e 4.31.

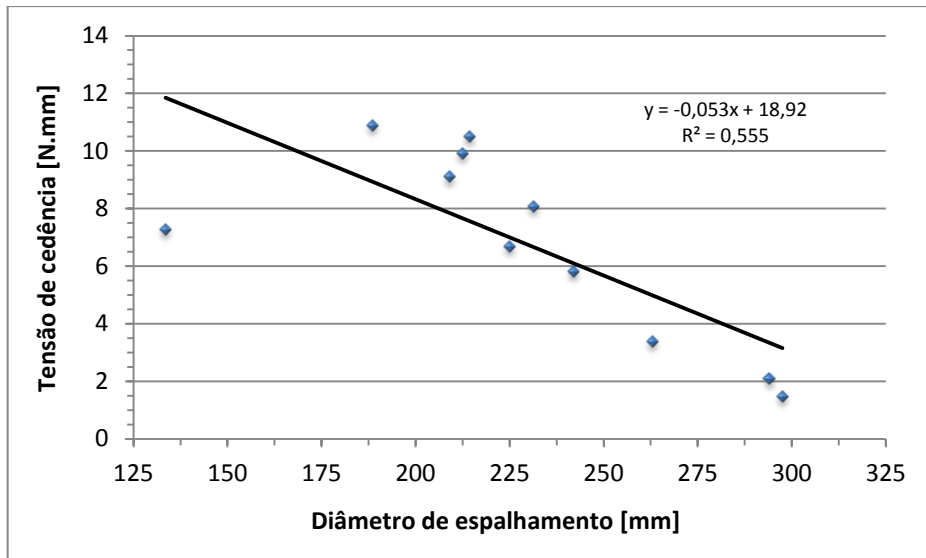


Figura 4.30 - Correlação entre a tensão de cedência e o diâmetro de espalhamento das argamassas da Série 1.

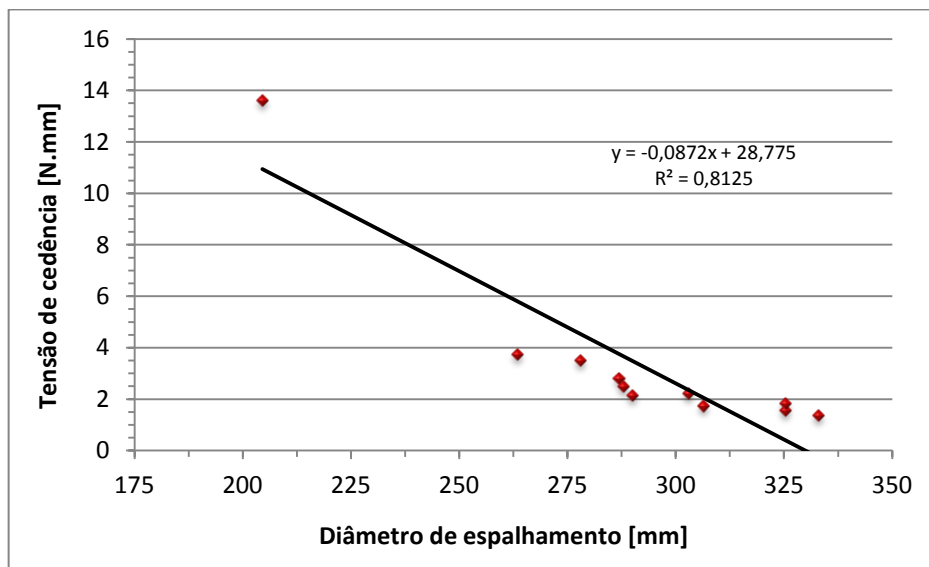


Figura 4.31 - Correlação entre a tensão de cedência e o diâmetro de espalhamento das argamassas da Série 2.

Em análise às figuras 4.30 e 4.31, pode ser observada, tanto nas argamassas da Série 1 como nas argamassas da Série 2, uma relação praticamente linear entre as tensões de cedência e os diâmetros de espalhamento. Isto significa por exemplo que quanto menor forem os valores da tensão cedência, maior é o diâmetro de espalhamento, registado através do ensaio do cone. Existem no entanto dois pontos que estão claramente mais afastados dos restantes, e que

afetam negativamente o coeficiente de determinação, R^2 . Estes 2 pontos correspondem às argamassas com a taxa de substituição de AFN por AFR de 50%. Este “desvio” pode ser o resultado da possível falta de fluidez das argamassas derivada da elevada percentagem de agregados finos reciclados, agregados esses contendo partículas com formas irregulares e acompanhados de elevadas percentagens de finos. A substituição total da areia natural 0/4 por AFR também levou a um menor teor de volume de pasta nessas argamassas.

BANFILL e TATTERSALL (1983) foram os primeiros a documentar a existência de uma relação linear entre a tensão de cedência e o espalhamento das argamassas.

4.3.3.7.2. Viscosidade versus Tempo de escoamento

Nas figuras 4.32 e 4.33 apresentam-se as correlações entre a viscosidade e os tempos de escoamento obtidos no estudo reológico das argamassas (Séries 1 e 2). Fazendo uma análise aos gráficos, pode ser observada claramente uma forte relação linear entre os dois parâmetros abordados, assim como havia sido observado na correlação do diâmetro de espalhamento e a tensão de cedência. No entanto, os coeficientes de determinação nesta correlação apresentam valores mais precisos ($R^2 = 0,959$ para Série 1, e $R^2 = 0,953$ para Série 2) do que os registados na correlação da tensão de cedência com o diâmetro de espalhamento ($R^2 = 0,555$ para Série 1, e $R^2 = 0,813$ para Série 2). Outra informação que se pode obter a partir da análise das figuras 4.32 e 4.33 é que quanto maior for o valor da viscosidade, maior é também o valor do tempo de escoamento, obtido através do ensaio de fluidez do “Funil-V”.

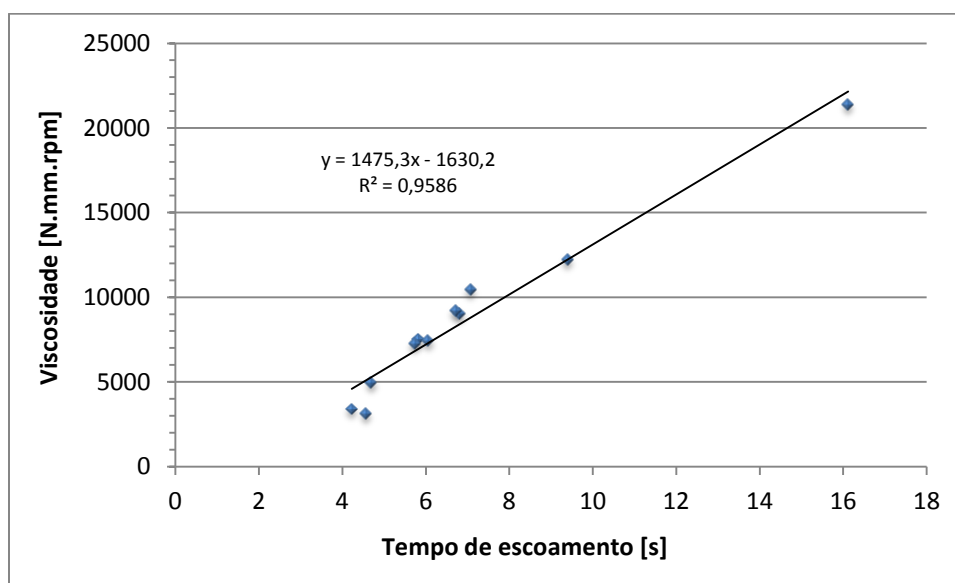


Figura 4.32 - Correlação entre a viscosidade e o tempo de escoamento das argamassas da Série 1.

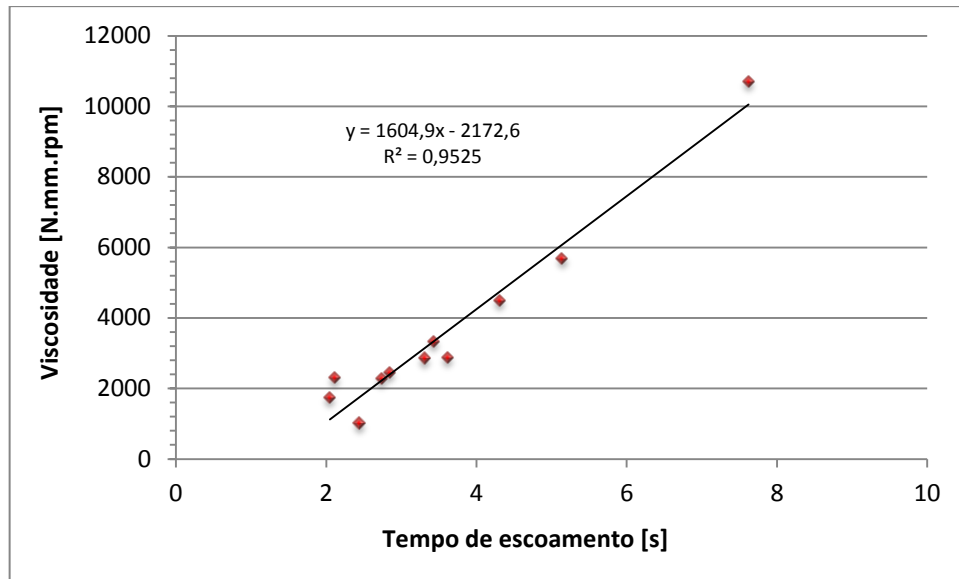


Figura 4.33 - Correlação entre a viscosidade e o tempo de escoamento das argamassas da Série 2.

4.3.3.8. Conclusões do estudo reológico das argamassas

O estudo do comportamento reológico da fase argamassa do BAC foi possível observar, em caráter de previsão, e de maneira pontual o efeito que a incorporação de AFR pode suscitar no BAC. A iniciar pelo fato de que o acréscimo de substituição de AFR exige um aumento dos volumes de água de amassadura. O aumento da área de superfície específica e da rugosidade das misturas provocada pelo AFR tem o efeito de incrementar a tensão de cedência e também da viscosidade plástica relativa ou melhor dizendo da sua consistência. Dependendo da composição da argamassa (binária ou ternária) o efeito no acréscimo da tensão de cedência pode ser atenuado, como no caso da adição de cinza volante. Confirma-se aqui, assim como no caso do BAC, que a fase argamassa tem um comportamento reológico que se associa a descrição do modelo de Herschel-Bulkley. Por fim, pode-se prever que a incorporação de AFR manterá no BAC o seu comportamento típico tixotrópico.

Capítulo 5 - Conclusões gerais

5.1. Conclusões gerais

Em termos conclusivos, o trabalho de pesquisa bibliográfica realizado neste estudo permitiu averiguar a existência de variados modelos capazes de efetuar a análise reológica de pastas, argamassas e betões. Porém, mesmo com a existência destes apetrechos de avaliação, em Portugal ainda não é dada a devida importância ao assunto da reologia, e daí o seu desconhecimento por parte de muitos engenheiros civis. Em consequência disto, entre outras, o betão auto-compactável não é utilizado com muita frequência no nosso país. O estudo reológico é uma atividade imprescindível na obtenção das condições adequadas para a eficiente aplicação deste tipo de betão.

Um dos temas que ainda se encontra pouco divulgado é a introdução de agregados finos reciclados no BAC. Assim, houve a intenção de estudar a influência deste resíduo na composição do betão auto-compactável. Deste modo o estudo foi desenvolvido na fase argamassa do BAC.

Recorreu-se ao método de Nepomuceno para a produção das argamassas desejadas. Evidenciaram-se argamassas com associação binária de finos (cimento e pó calcário) e ainda argamassas de associação ternária (cimento, pó calcário e cinza volante). Com base nas argamassas binárias e ternárias pretendia-se ainda argamassas com a incorporação crescente e sucessiva (patamares de 10% até limite de 50% de substituição) de agregados finos reciclados por permuta com a areia natural 0/4 rolada. Para além disto foram ainda criados dois grupos de argamassas, um deles apelidado de corrigido, por ter a composição necessária para atingir os critérios de auto-compactabilidade, e um outro grupo de argamassas com valores de referência, não corrigidos.

Em termos de resultados finais relativos aos ensaios efetuados, pretendidos para a avaliação do comportamento reológico das argamassas de BAC, observaram-se os seguintes:

- A incorporação crescente de agregados finos reciclados nas argamassas de associação binária leva a um aumento dos volumes de água de amassadura, necessárias para a obtenção da adequada auto-compactabilidade, enquanto nas argamassas ternárias o efeito é o oposto. Esta redução verificada nas misturas ternárias deve-se à esfericidade das partículas de cinza volante combinada com a ação do superplastificante;

- A incorporação crescente de agregados finos reciclados nas argamassas binárias e ternárias tem o efeito de incrementar o valor da tensão de cedência nas mesmas. Tal acontece devido ao aumento do volume de finos existentes nos agregados reciclados e também ao aumento das áreas de superfície específica do agregado;
- Os agregados finos reciclados quando incorporados em maior percentagem nas argamassas levam a viscosidades mais elevadas. A diminuição dos teores de pasta e as características dos agregados reciclados (dimensões e formas irregulares, maiores áreas de superfície específica) e ainda efeitos de interferência entre partículas justificam esse fato;
- Os valores das tensões de cedência são geralmente mais reduzidos nas argamassas ternárias, comparativamente às binárias, devendo-se à presença das cinzas volantes, que possuem características fluidificantes, melhorando a fluidez e a deformabilidade das argamassas, independentemente das dosagens de superplastificante;
- A maior fluidez das argamassas ternárias, comparativamente às argamassas binárias, leva a diâmetros de espalhamento sempre mais elevados nas primeiras;
- Existe uma correlação linear entre o diâmetro de espalhamento e a tensão de cedência. Quanto maior a tensão de cedência, menor o diâmetro de espalhamento. Por sua vez existe também uma correlação linear entre a viscosidade e os tempos de escoamento do ensaio de fluidez. Quanto maior é a viscosidade, maior é o tempo de escoamento;
- As áreas de tixotropia aumentam com a crescente incorporação de agregado fino reciclado. Porém existem diferenças entre misturas binárias e ternárias. Nas binárias as regiões tixotrópicas perdem a sua energia e tornam-se reopéticas a partir dos 40% de taxa de substituição de areia natural 0/4, sendo exigida maior energia para a reestruturação acontecer. Nas misturas ternárias, a cinza volante não permite essa perda de energia, verificando-se sempre as características tixotrópicas independentemente das percentagens de substituição de AFR.

Em termos gerais, a incorporação crescente de agregados finos reciclados nas argamassas altera o volume de água de amassadura, incrementa o valor da tensão de cedência das argamassas, aumenta a viscosidade, e aumenta as áreas de tixotropia. Estas alterações são no entanto diferentes conforme a mistura seja binária ou ternária.

Pode dizer-se que os objetivos deste estudo do comportamento reológico de argamassas com a inclusão de agregados finos reciclados foram atingidos. Conclui-se que os agregados finos reciclados alteram o comportamento reológico da fase argamassa do betão auto-compactável,

e que conforme as dosagens dos seus componentes estes podem ser viáveis como componente do BAC.

Bibliografia

Alexander, M., Mindess, S. (2005). *Aggregates in Concrete*. Taylor & Francis, New York, 435 pp.

Amziane, S., Ferraris, C.F., Fowler, D.W. e Koehler, E.P. (2006). A new, portable rheometer for fresh self-consolidating concrete. *Special Publication*, **233**: p. 97-116.

Azzouz, L., Benabed, B., Kadri, E. e Kenai, S. (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement & Concrete Composites*, **34**: p. 1167-1173.

Banfill, P.F.G. (2003). The Rheology of fresh cement and concrete: A review. *Proceedings of 11th International Cement Chemistry Congress*. Durban, South Africa.

Banfill, P.F.G. e Tattersall, G.H. (1983). *The rheology of fresh concrete*. Pitman Books Ltd, London.

Barnes, H.A. (1997). Thixotropy: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **70**: Elsevier Science BV, pp. 1-33.

Barnes, H.A. (2000). *A handbook of elementary Rheology*. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, University of Wales, Wales.

Barnes, H.A., Hutton, J.F. e Walters, K. (1989). An introduction to Rheology. *Rheology Series*, **3**: p. 1-199.

Bartos, P. (1998). An appraisal of the Orimet Test: As a method for on-site assessment of fresh SCC concrete. *In International Workshop on Self-Compacting Concrete*, August 1998, p. 121-135.

Bartos, P.J.M. e Sonebi, M. (1999). Hardened SCC and its Bond with Reinforcement. *Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Stockholm, pp. 275-289.

Bartos, P.J.M., Sonebi, M. e Tamimi, A.K. (2002). *Workability and Rheology of fresh concrete: Compendium of tests*. RILEM, Cachan Cedex, France, 154 pp.

Beaudoin, J.J. e Ramachandran, V.S. (2000). *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications*. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA.

Belin, P., Habert, G., Thiery, M. e Roussel, N. (2014). Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates. *Materials and Structures*, **47**: p. 1451-1465.

Billberg, P. (1999). *Some Rheology Aspects on Fine Mortar Part of Concrete*. Licentiate Thesis. Royal Institute of Technology, Department of Structural Engineering.

Billberg, P. (2006). *Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete: Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest*. Doctoral Thesis. School of Architecture and the Built Environment, Division of Concrete Structures, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Bosiljkov, V.B. (2003). SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*, **33**: p. 1279-1286.

Brito, J. e Evangelista, L. (2005). Medição experimental da absorção de água de betões produzidos com agregados finos reciclados. In *SIABE05: Simpósio Ibero-Americano "O Betão nas Estruturas"*, Julho 5-7 (pp. 49-56). Coimbra, Portugal.

Buck, A. (1977). Recycled concrete as a source of aggregate. *ACI Journal*, **74**: p. 212-219.

Hansen, T.C., Narud, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete. *Concrete International*, **5**: p. 79-83.

Castro, A.L., Liborio, J.B.L. e Pandolfelli, V.C. (2009). Evaluation of fresh high performance concrete behaviour by rheometer assistance. *IBRACON Structures and Materials*, **2:4**, p. 282-305.

Castro, A.L., Liborio, J.B.L. e Pandolfelli, V.C. (2011). Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil: Revisão. *Cerâmica*, **57**: p. 63-75.

Corinaldesi, V., Moriconi, G. e Orlandi, G. (2002). Self-compacting concrete incorporating recycled aggregate. In *R. K. Dhir, P. C. Hewlett e L. J. Csetenyi (Eds.), Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction* (pp. 455-464). Dundee: Thomas Telford.

Coutinho, J.S., Figueiras, J., Nunes, S. e Oliveira, P.M. (2011). Rheological characterization of SCC mortars and pastes with changes induced by cement delivery. *Cement & Concrete Composites*, **33**: p. 103-115.

Duthoit, B., Kada-Benameur, H. e Wirquin, E. (2000). Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry. *Cement and Concrete Research*, **30**: p. 301-305.

EN 933-1 (2012). *Especificação Nacional para agregados e inertes: Análise granulométrica. Método de peneiração.*

Especificação LNEC E64 (1960). *Especificação para Cimento Portland: Determinação da massa específica.*

European Project Group (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use.*

Evangelista, L.M. (2014) *Comportamento de Betões com Agregados Finos Reciclados de Betão.* Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Ferraris, C.F. (1999). Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State-of-the-art-report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, **104:5**, p. 461-478.

Ferraris, C.F. e Larrard, F. (1998). Testing and modelling of fresh concrete rheology. National Institute of Standards and Technology.

Ferraris, C.F., Larrard, F. e Sedran, T. (1998). Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. *Materials and Structures*, **31**: p. 494-498.

Feys, D., Schutter, G.D. e Verhoeven, R. (2013). Parameters influencing pressure during pumping of self-compacting concrete. *Materials and Structures*, **46**: p. 533-555.

Figueiredo, M.M. e Moura, M.J. (2002). Aplicação das técnicas de picnometria de gás e de porosimetria de mercúrio à caracterização da madeira de *E. globulus*. *Silva Lusitana*, **10** (2): p. 207-216.

Fumoto, T. e Yamada, M. (2002). Influence of the quality of recycled fine aggregates on properties of concrete. *Memoirs of the Faculty of Engineering*, **43**: p. 97-103.

Geiker, M.R., Brandl, M., Thrane, L.N. e Nielsen, L.F. (2002). On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacting concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, **24**: p. 3-6.

Gottfredsen, F.R. e Thogersen, F. (1994). Recycling of concrete in aggressive environment. In E. K. Lauridsen (Ed.), *Demolition and Reuse of Concrete* (1st Ed., pp. 309-317). London: SPON Press.

Griesser, A. (2002). *Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures.* Doctoral Thesis. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

Grubbs, F.E. (1969) Procedures for detecting outlying observations in samples. *Taylor & Francis Group*, 11: p. 1-21.

Hansen, T.C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second State-of-the-art report developments 1945-1985. *Materials and Structures*, 19: p. 201-246.

Hashimoto, C., Tsuji, C. e Urano, S. (1999). Evaluation of flow of Self-Compacting Concrete by visualization technique. *Proceedings of the 1st RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*. Stockholm, Sweden.

Izmir Institute of Technology. (2008). *Manual: Viscosity of Newtonian and Non-Newtonian fluids*. Izmir Institute of Technology, Turkey.

Kealy, T. (2007a). *Tim's Top Tips: How to measure flow and viscosity curves for building and construction industries*. Acedido em 15 de Setembro de 2014, em: <http://www.rheologysolutions.com/downloads/resources/rheo346%20-%20Construction%20-%20Flow%20&%20Viscosity.pdf>

Kealy, T. (2007b). *Tim's Top Tips: How to measure thixotropy for building and construction industries*. Acedido em 15 de Setembro de 2014, em: <http://www.rheologysolutions.com/downloads/resources/rheo348-349%20-%20Contstruction%20-%20Thixotropy.pdf>

Khayat, K., Petit, J.-Y., Vanhove, Y. e Wirquin, E. (2007). Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Research*, 37: p. 655-670.

Khayat, K.H., Petit, J.-Y. e Wirquin, E. (2009). Coupled effect of time and temperature on variations of plastic viscosity of highly flowable mortars. *Cement and Concrete Research*, 39: p. 165-170.

Khayat, K. e Tangtermsirikul, S. (2000). *Fresh concrete properties (Background Document)*. Self-Compacting Concrete: State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC. RILEM Publications S.A.R.L., p. 17-22.

Kou, S.C. e Poon, C.S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 31: p. 622-627.

Larrard, F. (1999). *Concrete mixture proportioning: A Scientific approach*. E & FN Spon, London.

Larrard, F. e Sedran, T. (1999). Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. *Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Sweden, p. 321-332.

Leite, M. (2001). *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil (290 p.). Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Brasil.

Malhotra, V.M. (1976). CANMET Report 76-18: Use of recycled concrete as a new aggregate. *In Symposium on Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry*. Ottawa, Canada.

Nepomuceno, M. (2005). *Metodologia para a Composição de Betões Auto-Compactáveis*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, p. 3-550.

Nepomuceno, M., Oliveira, L.P. e Lopes, S. (2010). Parâmetros para a composição de Betões Auto-Compactáveis. *2º Congresso Ibérico sobre Betão Auto-Compactável*. Guimarães, Julho 2010.

Nielsen, L.F. (2001). Rheology of some fluid extreme composites. Reprint from the *Nordic Concrete Research*, 2: p. 83-93.

Nielsson, I. e Wallevik, O.H. (1998). Self-Compacting Concrete: A rheological approach. *Proceedings in International Workshop on Self-Compacting Concrete*, Kochi, Japan.

Nixon, P. (1978). Recycled concrete as na aggregate for concrete: A review. *Materials and Structures*, 11: 65, p. 371-378.

NP EN 206-1 (2007). *Norma Portuguesa para Betão. Parte 1: Especificação, Desempenho e Produção*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 1008 (2003). *Norma Portuguesa para água de amassadura para betão: Especificação para amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água*.

NP EN 1097-5 (2011). *Norma Portuguesa para agregados e inertes: Determinação do teor de água por secagem em estufa ventilada*.

NP EN 12350-8 (2010). *Norma Portuguesa para Betão Auto-Compactável: Ensaio de Espalhamento*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 12350-9 (2010). *Norma Portuguesa para Betão Auto-Compactável: Ensaio de Escoamento no Funil-V*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

Okamura, H. e Ouchi, M. (1999). Self-Compacting Concrete: Development, Present use and Future. *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Stockholm, Sweden, Sept. 1999, p. 3-14.

Ordóñez-Belloc, L.M., Rubio-Hernández, F.J. e Velázquez-Navarro, J.F. (2013). Rheology of concrete: A study case based upon the use of the concrete equivalent mortar. *Materials and Structures*, **46**: p. 587-605.

Pereira, P., Evangelista, L. e Brito, J. (2012). The effect of superplasticizers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, **28**: p. 722-729.

Pinto, H. (2011). *Propriedades do BAC com Incorporação de Agregados Finos Reciclados*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

Rangel, M. (2010). *Propriedades do BAC com Agregados Grossos Reciclados*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

Reinhardt, H.W. e Wüstholtz, T. (2006). About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological behaviour of self-compacting concrete. *Materials and Structures*, **39**: p. 683-693.

RILEM. (1994). RILEM TC 121: Specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, **27**: **9**, p. 557-559.

Rodrigues, F. (2011). *Caracterização dos Agregados Finos Reciclados Provenientes de Centrais de Reciclagem Portuguesas*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil (140 p.) Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

Sheinn, A.M.M. (2007). *Rheological Modeling of Self-Compacting Concrete*. Doctoral Thesis. Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore.

SIKA (2011). Catálogo de Informação Técnica, Superplastificante de Alto Desempenho - ViscoCrete® 3005, N.º 01.004, versão nº 1, V. N. Gaia.

Skarendahl, A. (1998). Self-compacting concrete in Sweden: Research and application. *International Workshop on Self-Compacting Concrete*, p. 60-71.

Solyman, M. (2005). *Classification of Recycled Sands and their Applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures*. Doctoral Thesis in Civil Engineering (194 p.). University of Kassel, Germany.

Suhr, S. (1991). Interactions between sulphate minerals and C₃A in cement paste Rheology. *Proceedings in Rheology of Fresh Cement and Concrete*. London, England, pp. 37-46.

Ulsen, C. (2011). *Caracterização e Separabilidade de Agregados Miúdos Produzidos a partir de Resíduos de Construção e Demolição*. Tese de Doutoramento em Engenharia Mineral (222 p.). Universidade de São Paulo, Brasil.

- Vieira, J.P. (2010). *Interacção Cimento-Superplastificante: Avaliação da Estabilidade do Comportamento*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Vieira, M. (2008). *Betões Auto-Compactáveis: Reologia do Betão no Estado Fresco*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Vikan, H. (2005). *Rheology and Reactivity of Cementitious Binders with Plasticizers*. Doctoral Thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Viskomat (2005). *Manual Viskomat NT*.
- Vom Berg, W. (1979). Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behavior of cement pastes. *Magazine of Concrete Research*, **31**: p. 211-216.
- Wang, Z. (2012). *The Effects of Aggregate Moisture Conditions on Rheological Behaviors of High-Workability Mortar Prepared with Fine Recycled Concrete Aggregate*. Licentiate Thesis in Civil Engineering (74 p.). Texas State University, USA.
- Westerholm, M. (2006). *Rheology of the Mortar Phase of Concrete with Crushed Aggregate*. Licentiate Thesis. Lulea Technology University, Sweden.
- Winnefeld, F. (2002). Rheological behavior of Portland cement pastes during early hydration. *Proceedings in 24th International Conference on Cement Microscopy*. San Diego, California, USA, pp. 18-31.

Anexos

Anexo A

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS

Anexo A.1

COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS - SÉRIE 1 CORRIGIDA

Tabela A.1.1 - Composição da argamassa Amostra1.FC.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS						
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos			Data	
Amostra1.FC.0,80		40C1+60FC			07-07-2014	
Parâmetros da composição						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%				
0,80	0,70	0,34				
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	3040	2380	2170	2720	2650	
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³						
δs1	δs2	δs3	---	---	---	
2661	2647	---	---	---	---	
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³						
δsp	---	---	---	---	---	
1050	---	---	---	---	---	
Abertura da malha (mm)		Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)	
(mm)		0,50	0,50	---	Percentagem de passados	
8,000	100,00	100,00	---	---	100,00	
4,000	100,00	99,15	---	---	99,58	
2,000	99,96	92,78	---	---	96,37	
1,000	99,00	68,14	---	---	83,57	
0,500	54,85	20,92	---	---	37,89	
0,250	7,59	1,21	---	---	4,40	
0,125	0,75	0,21	---	---	0,48	
0,063	0,22	0,03	---	---	0,13	
Resíduo	0,00	0,00	---	---	0,00	
Módulos de finura						
2,379	3,176	7,000	2,777			
$\delta_p = 2888,00 \text{ kg/m}^3$ $v_{sp}/v_p = 0,009352 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $v_p = 0,337912 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $v_w = 0,236538 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $v_{sp} = 0,00316 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $v_s = 0,42239 \text{ m}^3/\text{m}^3$						
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros			
C1= 424,4kg	C2= 0,0kg	CV= 0,0kg	MS= 0,0kg	FC= 551,5kg	FG= 0,0kg	
W= 236,5litros	Sp= 3,16litros	S1= 562,0kg	S2= 559,0kg	S3= 0,0kg	---	
<u>Massa total, em kg</u>		<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>		<u>Razão água/cimento</u>		
2336,8		0,557		0,557		
<u>Razão água/finos</u>		<u>Razão água/finos</u>		<u>Razão água/finos</u>		
0,242		0,242		0,242		
C1= 679,1g	C2= 0,0g	CV= 0,0g	MS= 0,0g	FC= 882,4g	FG= 0,0g	
W= 378,5ml	Sp= 5,06ml	S1= 899,2g	S2= 894,5g	S3= 0,0g	---	
<u>Massa total, em g</u>		<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>		<u>Razão água/cimento</u>		
3738,8		0,557		0,557		
<u>Razão água/finos</u>		<u>Razão água/finos</u>		<u>Razão água/finos</u>		
0,242		0,242		0,242		

Tabela A.1.2 - Composição da argamassa Amostra2.FC.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS						
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos			Data	
Amostra2.FC.0,80		40C1+60FC+10ARCF			11-07-2014	
Parâmetros da composição						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%				
0,80	0,71	0,33				
Composição da mistura de finos						
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg	
0,40	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³						
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg	
3140	3040	2380	2170	2720	2650	
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³						
δs1	δs2	δs3	---	---	---	
2661	2647	2310	---	---	---	
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³						
δsp	---	---	---	---	---	
1050	---	---	---	---	---	
Abertura da malha (mm)		Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)	
		0,50	0,40	0,10		
Percentagem de passados						
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00		
4,000	100,00	99,15	99,91	99,65		
2,000	99,96	92,78	81,92	95,28		
1,000	99,00	68,14	53,70	82,13		
0,500	54,85	20,92	29,46	38,74		
0,250	7,59	1,21	12,90	5,57		
0,125	0,75	0,21	5,47	1,01		
0,063	0,22	0,03	1,43	0,27		
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00		
Módulos de finura						
		2,379	3,176	3,166	2,776	
δp= 2888,00kg/m³ vsp/vp= 0,009077 m³/m³ vp= 0,336805 m³/m³ vwe= 0,239132 m³/m³ vsp= 0,003057 m³/m³ vs= 0,421006 m³/m³						
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,80 litros			
C1= 423,0kg	<u>Massa total, em kg</u>		C1= 676,8g	<u>Massa total, em g</u>		
C2= 0,0kg	2220,9		C2= 0,0g	3553,5		
CV= 0,0kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>		CV= 0,0g	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>		
MS= 0,0kg	0,565		MS= 0,0g	0,565		
FC= 549,7kg	<u>Razão água/cimento</u>		FC= 879,5g	<u>Razão água/cimento</u>		
FG= 0,0kg	0,565		FG= 0,0g	0,565		
W= 239,1litros	<u>Razão água/finos</u>		W= 382,6ml	<u>Razão água/finos</u>		
Sp= 3,06litros	0,246		Sp= 4,89ml	0,246		
S1= 560,1kg			S1= 896,2g			
S2= 445,8kg			S2= 713,2g			
S3= 97,3kg			S3= 155,6g			

Tabela A.1.3 - Composição da argamassa Amostra3.FC.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS				
Identificação da argamassa Amostra3.FC.0,80		Identificação da mistura de finos 40C1+60FC+20ARCF		Data 11-07-2014
Parâmetros da composição				
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%		
0,800	0,710	0,335		
Composição da mistura de finos				
fc1	fc2	fcv	fms	ffc
0,40	0,00	0,00	0,00	0,60
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³				
δc1	δc2	δcv	δms	δfc
3140	3040	2380	2170	2720
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³				
δs1	δs2	δs3	...	...
2661	2647	2310	...	...
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³				
δsp	...	...	...	...
1050	...	...	...	...
Abertura da malha (mm)				
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00
4,000	100,00	99,15	99,91	99,73
2,000	99,96	92,78	81,92	94,20
1,000	99,00	68,14	53,70	80,68
0,500	54,85	20,92	29,46	39,59
0,250	7,59	1,21	12,90	6,74
0,125	0,75	0,21	5,47	1,53
0,063	0,22	0,03	1,43	0,41
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura				
2,379	3,176	3,166	2,775	
δp= 2888,00kg/m³ Vsp/Vp= 0,009214m³/m³ Vp= 0,336789m³/m³ Vw= 0,239121m³/m³ Vsp= 0,003103m³/m³ Vs= 0,420987m³/m³				
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros				
C1=	423,0kg			
C2=	0,0kg	<u>Massa total, em kg</u>		
CV=	0,0kg	2109,5		
MS=	0,0kg	<u>Razão água/mat. cimentícios</u>		
FC=	549,6kg	0,565		
FG=	0,0kg	<u>Razão água/cimento</u>		
W=	239,1litros	0,565		
Sp=	3,10litros	<u>Razão água/finos</u>		
S1=	560,1kg	0,246		
S2=	334,3kg			
S3=	194,5kg			
Quantidades para um volume de: 1,60 litros				
C1=	676,8g			
C2=	0,0g	<u>Massa total, em g</u>		
CV=	0,0g	3375,1		
MS=	0,0g	<u>Razão água/mat. cimentícios</u>		
FC=	879,4g	0,565		
FG=	0,0g	<u>Razão água/cimento</u>		
W=	382,6ml	0,565		
Sp=	4,97ml	<u>Razão água/finos</u>		
S1=	896,2g	0,246		
S2=	534,9g			
S3=	311,2g			

Tabela A.1.4 - Composição da argamassa Amostra4.FC.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS						
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos			Data	
Amostra4.FC.0,80		40C1+60FC+30ARCF			11-07-2014	
Parâmetros da composição						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%				
0,800	0,720	0,335				
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	3040	2380	2170	2720	2650	
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³						
δs1	δs2	δs3	---	---	---	
2661	2647	2310	---	---	---	
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³						
δsp	---	---	---	---	---	
1050	---	---	---	---	---	
Abertura da malha (mm)		Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)	
		0,50	0,20	0,30		
Percentagem de passados						
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00		
4,000	100,00	99,15	99,91	99,80		
2,000	99,96	92,78	81,92	93,11		
1,000	99,00	68,14	53,70	79,24		
0,500	54,85	20,92	29,46	40,45		
0,250	7,59	1,21	12,90	7,91		
0,125	0,75	0,21	5,47	2,06		
0,063	0,22	0,03	1,43	0,55		
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00		
Módulos de finura						
		2,379	3,176	3,166	2,774	
δp= 2000,00kg/m³ Vsp/Vp= 0,009214m³/m³ Vp= 0,335659m³/m³ Vw= 0,241674m³/m³ Vsp= 0,003093m³/m³ Vs= 0,419574m³/m³						
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros			
C1= 421,6kg	<u>Massa total, em kg</u>		C1= 674,5g	<u>Massa total, em g</u>		
C2= 0,0kg	1994,7		C2= 0,0g	3191,5		
CV= 0,0kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>		CV= 0,0g	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>		
MS= 0,0kg	0,573		MS= 0,0g	0,573		
FC= 547,8kg	<u>Razão água/cimento</u>		FC= 876,5g	<u>Razão água/cimento</u>		
FG= 0,0kg	0,573		FG= 0,0g	0,573		
W= 241,7litros	<u>Razão água/finos</u>		W= 386,7ml	<u>Razão água/finos</u>		
Sp= 3,09litros	0,249		Sp= 4,95ml	0,249		
S1= 558,2kg			S1= 893,2g			
S2= 222,1kg			S2= 355,4g			
S3= 290,8kg			S3= 465,2g			

Tabela A.1.5 - Composição da argamassa Amostra5.FC.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS																																																																										
Identificação da argamassa Amostra5.FC.0,80			Identificação da mistura de finos 40C1+60FC+40ARCF			Data 11-07-2014																																																																				
Parâmetros da composição Vp/Vs Vw/Vp Sp/P% 0,800 0,725 0,335			Composição da mistura de finos fc1 fc2 fcv fms ffc ffg 0,40 0,00 0,00 0,00 0,60 0,00			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Abertura da malha (mm)</th> <th>Areia0/2 a1</th> <th>Areia0/4 a2</th> <th>Areia05 a3</th> <th>Mistura (Curva Real)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Percentagem de passados</td> </tr> <tr> <td>8,000</td> <td>100,00</td> <td>100,00</td> <td>100,00</td> <td>100,00</td> </tr> <tr> <td>4,000</td> <td>100,00</td> <td>99,15</td> <td>99,91</td> <td>99,88</td> </tr> <tr> <td>2,000</td> <td>99,96</td> <td>92,78</td> <td>81,92</td> <td>92,03</td> </tr> <tr> <td>1,000</td> <td>99,00</td> <td>68,14</td> <td>53,70</td> <td>77,79</td> </tr> <tr> <td>0,500</td> <td>54,85</td> <td>20,92</td> <td>29,46</td> <td>41,30</td> </tr> <tr> <td>0,250</td> <td>7,59</td> <td>1,21</td> <td>12,90</td> <td>9,08</td> </tr> <tr> <td>0,125</td> <td>0,75</td> <td>0,21</td> <td>5,47</td> <td>2,58</td> </tr> <tr> <td>0,063</td> <td>0,22</td> <td>0,03</td> <td>1,43</td> <td>0,69</td> </tr> <tr> <td>Resíduo</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Módulos de finura</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2,379</td> <td>3,176</td> <td>3,166</td> <td>2,773</td> </tr> </tbody> </table>				Abertura da malha (mm)	Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)	Percentagem de passados					8,000	100,00	100,00	100,00	100,00	4,000	100,00	99,15	99,91	99,88	2,000	99,96	92,78	81,92	92,03	1,000	99,00	68,14	53,70	77,79	0,500	54,85	20,92	29,46	41,30	0,250	7,59	1,21	12,90	9,08	0,125	0,75	0,21	5,47	2,58	0,063	0,22	0,03	1,43	0,69	Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	Módulos de finura						2,379	3,176	3,166	2,773
Abertura da malha (mm)	Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)																																																																						
Percentagem de passados																																																																										
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00																																																																						
4,000	100,00	99,15	99,91	99,88																																																																						
2,000	99,96	92,78	81,92	92,03																																																																						
1,000	99,00	68,14	53,70	77,79																																																																						
0,500	54,85	20,92	29,46	41,30																																																																						
0,250	7,59	1,21	12,90	9,08																																																																						
0,125	0,75	0,21	5,47	2,58																																																																						
0,063	0,22	0,03	1,43	0,69																																																																						
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00																																																																						
Módulos de finura																																																																										
	2,379	3,176	3,166	2,773																																																																						
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³ δc1 δc2 δcv δms δfc δfg 3140 3040 2380 2170 2720 2650			Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³ δs1 δs2 δs3 --- --- 2661 2647 2310 --- ---			δp= 2888,00kg/m³ vsp/vpe= 0,009214m³/m³ vpe= 0,335097m³/m³ vwe= 0,242945m³/m³ vsp= 0,003068m³/m³ vs= 0,418871m³/m³																																																																				
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³ δsp --- --- --- --- 1050 --- --- --- ---			Quantidades para um volume de: 1000,00 litros C1= 420,9kg C2= 0,0kg <u>Massa total, em kg</u> CV= 0,0kg 1882,1 MS= 0,0kg <u>Razão água/(mat. cimentícios)</u> FC= 546,9kg 0,577 FG= 0,0kg <u>Razão água/cimento</u> W= 242,9litros 0,577 Sp= 3,09litros <u>Razão água/finos</u> S1= 557,3kg 0,251 S2= 110,9kg S3= 387,0kg																																																																							
Quantidades para um volume de: 1,80 litros C1= 673,4g C2= 0,0g <u>Massa total, em g</u> CV= 0,0g 3011,4 MS= 0,0g <u>Razão água/(mat. cimentícios)</u> FC= 875,0g 0,577 FG= 0,0g <u>Razão água/cimento</u> W= 388,7 ml 0,577 Sp= 4,94ml <u>Razão água/finos</u> S1= 891,7g 0,251 S2= 177,4g S3= 619,3g																																																																										

Tabela A.1.6 - Composição da argamassa Amostra6.FC.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS				
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos		Data
Amostra6.FC.0,80		40C1+60FC+50ARCF		11-07-2014
Parâmetros da composição				
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%		
0,800	0,700	0,335		
Composição da mistura de finos				
fc1	fc2	fcv	fms	ffc
0,40	0,00	0,00	0,00	0,80
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³				
δc1	δc2	δcv	δms	δfc
3140	3040	2380	2170	2720
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³				
δs1	δs2	δs3	---	---
2661	2647	2310	---	---
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³				
δsp	---	---	---	---
1050	---	---	---	---
Abertura da malha (mm)		Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3
(mm)		0,50	0,00	0,50
Mistura (Curva Real)				
Percentagem de passados				
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00
4,000	100,00	99,15	99,91	99,96
2,000	99,96	92,78	81,92	90,94
1,000	99,00	88,14	53,70	76,35
0,500	54,85	20,92	29,46	42,16
0,250	7,59	1,21	12,90	10,25
0,125	0,75	0,21	5,47	3,11
0,063	0,22	0,03	1,43	0,83
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura				
		2,379	3,176	3,166
		2,772		
δp= 2388,00kg/m ³ vsp/vp= 0,009214m ³ /m ³ vp= 0,337928m ³ /m ³ vwe= 0,236549m ³ /m ³ vsp= 0,003114m ³ /m ³ vs= 0,422409m ³ /m ³				
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros		Quantidades para um volume de: 1,60 litros		
C1= 424,4kg	C2= 0,0kg	C1= 679,1g	C2= 0,0g	CV= 0,0g
CV= 0,0kg	MS= 0,0kg	CV= 0,0g	MS= 0,0g	FC= 882,4g
FC= 551,5kg	FG= 0,0kg	FC= 882,4g	FG= 0,0g	W= 378,5ml
FG= 0,0kg	W= 236,5litros	W= 378,5ml	Sp= 4,98ml	S1= 899,2g
Sp= 3,11litros	S1= 562,0kg	S1= 899,2g	S2= 0,0g	S3= 780,6g
S1= 562,0kg	S2= 0,0kg	S2= 0,0g		
S2= 0,0kg	S3= 487,9kg	S3= 780,6g		
S3= 487,9kg	Massa total, em kg 1777,8 Razão água/(mat. cimentícios) 0,557 Razão água/cimento 0,557 Razão água/finos 0,242		Massa total, em g 2844,4 Razão água/(mat. cimentícios) 0,557 Razão água/cimento 0,557 Razão água/finos 0,242	

Anexo A.2

COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS - SÉRIE 2 CORRIGIDA

Tabela A.2.1 - Composição da argamassa Amostra1.FCCV.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS						
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos			Data	
Amostra1.FCCV.0,80		40C1+50FC+10CV			11-07-2014	
Parâmetros da composição						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%				
0,800	0,755	0,385				
Composição da mistura de finos						
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg	
0,40	0,00	0,10	0,00	0,50	0,00	
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³						
δs1	δs2	δcv	δms	δfc	δfg	
3140	3040	2380	2170	2720	2650	
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³						
δs1	δs2	δs3	---	---		
2661	2647		---	---		
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³						
δsp	---	---	---	---		
1050	---	---	---	---		
Abertura da malha (mm)		Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)	
		0,50	0,50			
Percentagem de passados						
8,000	100,00	100,00			100,00	
4,000	100,00	99,15			99,58	
2,000	99,96	92,78			96,37	
1,000	99,00	68,14			83,57	
0,500	54,85	20,92			37,89	
0,250	7,59	1,21			4,40	
0,125	0,75	0,21			0,48	
0,063	0,22	0,03			0,13	
Resíduo	0,00	0,00			0,00	
Módulos de finura						
	2,379	3,176	7,000	2,777		
δp= 2854,00kg/m³ vsp/vpe 0,010465m³/m³ Vp= 0,331624m³/m³ Vw= 0,250376m³/m³ vsp= 0,00347m³/m³ Vs= 0,41453m³/m³						
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros			
C1=	416,5kg		C1=	666,4g		
C2=	0,0kg	<u>Massa total, em kg</u>	C2=	0,0g	<u>Massa total, em g</u>	
CV=	78,9kg	2300,6	CV=	126,3g	3681,0	
MS=	0,0kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>	MS=	0,0g	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>	
FC=	451,0kg	0,505	FC=	721,6g	0,505	
FG=	0,0kg	<u>Razão água/cimento</u>	FG=	0,0g	<u>Razão água/cimento</u>	
W=	250,4litros	0,601	W=	400,6ml	0,601	
Sp=	3,47litros	<u>Razão água/finos</u>	Sp=	5,55ml	<u>Razão água/finos</u>	
S1=	551,5kg	0,265	S1=	882,5g	0,265	
S2=	548,6kg		S2=	877,8g		
S3=	0,0kg		S3=	0,0g		

Tabela A.2.2 - Composição da argamassa Amostra2.FCCV.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS						
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos			Data	
Amostra2.FCCV.0,80		40C1+50FC+10CV+10ARCF			11-07-2014	
Parâmetros da composição						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%				
0,800	0,740	0,385				
Composição da mistura de finos						
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg	
0,40	0,00	0,10	0,00	0,50	0,00	
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³						
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg	
3140	3040	2380	2170	2720	2650	
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³						
δs1	δs2	δs3	---	---		
2661	2647	2310	---	---		
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³						
δsp	---	---	---	---		
1050	---	---	---	---		
Abertura da malha (mm)		Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)	
		0,50	0,40	0,10		
Percentagem de passados						
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00		
4,000	100,00	99,15	99,91	99,65		
2,000	99,96	92,78	81,92	95,28		
1,000	99,00	68,14	53,70	82,13		
0,500	54,85	20,92	29,46	38,74		
0,250	7,59	1,21	12,90	5,57		
0,125	0,75	0,21	5,47	1,01		
0,063	0,22	0,03	1,43	0,27		
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00		
Módulos de finura						
		2,379	3,176	3,166	2,776	
δp= 2854,00kg/m³ vsp/vp= 0,010465m³/m³ vp= 0,333282m³/m³ vwe= 0,246628m³/m³ vsp= 0,003488m³/m³ vs= 0,416602m³/m³						
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros C1= 418,6kg C2= 0,0kg CV= 79,3kg MS= 0,0kg FC= 453,3kg FG= 0,0kg W= 246,6litros Sp= 3,49litros S1= 554,3kg S2= 441,1kg S3= 96,2kg			Quantidades para um volume de: 1,80 litros C1= 669,8g C2= 0,0g CV= 126,9g MS= 0,0g FC= 725,2g FG= 0,0g W= 394,6ml Sp= 5,58ml S1= 886,9g S2= 705,8g S3= 154,0g			
Massa total, em kg 2196,9			Massa total, em g 3515,0			
Razão água/(mat. cimentícios) 0,495			Razão água/(mat. cimentícios) 0,495			
Razão água/cimento 0,589			Razão água/cimento 0,589			
Razão água/finos 0,259			Razão água/finos 0,259			

Tabela A.2.3 - Composição da argamassa Amostra3.FCCV.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS																																																																														
Identificação da argamassa Amostra3.FCCV.0,80		Identificação da mistura de finos 40C1+50FC+10CV+20ARCF		Data 11-07-2014																																																																										
Parâmetros da composição Vp/Vs Vw/Vp Sp/P% 0,800 0,740 0,385			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Abertura da malha (mm)</th> <th>Areia 0/2</th> <th>Areia 0/4</th> <th>Areia R</th> <th rowspan="2">Mistura (Curva Real)</th> </tr> <tr> <th>a1</th> <th>a2</th> <th>a3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0,50</td> <td>0,30</td> <td>0,20</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Percentagem de passados</td> </tr> <tr> <td>8,000</td> <td>100,00</td> <td>100,00</td> <td>100,00</td> <td>100,00</td> </tr> <tr> <td>4,000</td> <td>100,00</td> <td>99,15</td> <td>99,91</td> <td>99,73</td> </tr> <tr> <td>2,000</td> <td>99,96</td> <td>92,78</td> <td>81,92</td> <td>94,20</td> </tr> <tr> <td>1,000</td> <td>99,00</td> <td>68,14</td> <td>53,70</td> <td>80,68</td> </tr> <tr> <td>0,500</td> <td>54,85</td> <td>20,92</td> <td>29,46</td> <td>39,59</td> </tr> <tr> <td>0,250</td> <td>7,59</td> <td>1,21</td> <td>12,90</td> <td>6,74</td> </tr> <tr> <td>0,125</td> <td>0,75</td> <td>0,21</td> <td>5,47</td> <td>1,53</td> </tr> <tr> <td>0,063</td> <td>0,22</td> <td>0,03</td> <td>1,43</td> <td>0,41</td> </tr> <tr> <td>Resíduo</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Módulos de finura</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2,379</td> <td>3,176</td> <td>3,166</td> <td>2,775</td> </tr> </tbody> </table>			Abertura da malha (mm)	Areia 0/2	Areia 0/4	Areia R	Mistura (Curva Real)	a1	a2	a3		0,50	0,30	0,20		Percentagem de passados					8,000	100,00	100,00	100,00	100,00	4,000	100,00	99,15	99,91	99,73	2,000	99,96	92,78	81,92	94,20	1,000	99,00	68,14	53,70	80,68	0,500	54,85	20,92	29,46	39,59	0,250	7,59	1,21	12,90	6,74	0,125	0,75	0,21	5,47	1,53	0,063	0,22	0,03	1,43	0,41	Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	Módulos de finura						2,379	3,176	3,166	2,775
Abertura da malha (mm)	Areia 0/2	Areia 0/4					Areia R	Mistura (Curva Real)																																																																						
	a1	a2				a3																																																																								
	0,50	0,30				0,20																																																																								
Percentagem de passados																																																																														
8,000	100,00	100,00				100,00	100,00																																																																							
4,000	100,00	99,15				99,91	99,73																																																																							
2,000	99,96	92,78				81,92	94,20																																																																							
1,000	99,00	68,14				53,70	80,68																																																																							
0,500	54,85	20,92				29,46	39,59																																																																							
0,250	7,59	1,21	12,90	6,74																																																																										
0,125	0,75	0,21	5,47	1,53																																																																										
0,063	0,22	0,03	1,43	0,41																																																																										
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00																																																																										
Módulos de finura																																																																														
	2,379	3,176	3,166	2,775																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="6" style="text-align: center;">Composição da mistura de finos</th> </tr> <tr> <th>fc1</th> <th>fc2</th> <th>fcv</th> <th>fms</th> <th>ffc</th> <th>ffg</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,40</td> <td>0,00</td> <td>0,10</td> <td>0,00</td> <td>0,50</td> <td>0,00</td> </tr> </tbody> </table>						Composição da mistura de finos						fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg	0,40	0,00	0,10	0,00	0,50	0,00																																																							
Composição da mistura de finos																																																																														
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg																																																																									
0,40	0,00	0,10	0,00	0,50	0,00																																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="6" style="text-align: center;">Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³</th> </tr> <tr> <th>δc1</th> <th>δc2</th> <th>δcv</th> <th>δms</th> <th>δfc</th> <th>δfg</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3140</td> <td>3040</td> <td>2380</td> <td>2170</td> <td>2720</td> <td>2650</td> </tr> </tbody> </table>						Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³						δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg	3140	3040	2380	2170	2720	2650																																																							
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³																																																																														
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg																																																																									
3140	3040	2380	2170	2720	2650																																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="6" style="text-align: center;">Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³</th> </tr> <tr> <th>δs1</th> <th>δs2</th> <th>δs3</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2661</td> <td>2647</td> <td>2310</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> </tbody> </table>						Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³						δs1	δs2	δs3	---	---	---	2661	2647	2310	---	---	---																																																							
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³																																																																														
δs1	δs2	δs3	---	---	---																																																																									
2661	2647	2310	---	---	---																																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="6" style="text-align: center;">Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³</th> </tr> <tr> <th>δsp</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> <th>---</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1050</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> </tbody> </table>						Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³						δsp	---	---	---	---	---	1050	---	---	---	---	---																																																							
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³																																																																														
δsp	---	---	---	---	---																																																																									
1050	---	---	---	---	---																																																																									
<table style="width: 100%;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: right;">δp=</td> <td>2854,00 kg/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">vsp/Vp=</td> <td>0,010465 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">vp=</td> <td>0,333282 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">vw=</td> <td>0,246628 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">vsp=</td> <td>0,003488 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">vs=</td> <td>0,416602 m³/m³</td> </tr> </tbody> </table>						δp=	2854,00 kg/m³	vsp/Vp=	0,010465 m³/m³	vp=	0,333282 m³/m³	vw=	0,246628 m³/m³	vsp=	0,003488 m³/m³	vs=	0,416602 m³/m³																																																													
δp=	2854,00 kg/m³																																																																													
vsp/Vp=	0,010465 m³/m³																																																																													
vp=	0,333282 m³/m³																																																																													
vw=	0,246628 m³/m³																																																																													
vsp=	0,003488 m³/m³																																																																													
vs=	0,416602 m³/m³																																																																													
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros C1= 418,6kg C2= 0,0kg CV= 79,3kg MS= 0,0kg FC= 453,3kg FG= 0,0kg W= 246,6litros Sp= 3,49litros S1= 554,3kg S2= 330,8kg S3= 192,5kg			Quantidades para um volume de: 1,60 litros C1= 669,8g C2= 0,0g CV= 126,9g MS= 0,0g FC= 725,2g FG= 0,0g W= 394,6ml Sp= 5,58ml S1= 886,9g S2= 529,3g S3= 308,0g																																																																											
<table style="width: 100%;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: right;">Massa total, em kg</td> <td>2086,6</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Razão água/(mat. cimentícios)</td> <td>0,495</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Razão água/cimento</td> <td>0,589</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Razão água/finos</td> <td>0,259</td> </tr> </tbody> </table>			Massa total, em kg	2086,6	Razão água/(mat. cimentícios)	0,495	Razão água/cimento	0,589	Razão água/finos	0,259	<table style="width: 100%;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: right;">Massa total, em g</td> <td>3338,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Razão água/(mat. cimentícios)</td> <td>0,495</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Razão água/cimento</td> <td>0,589</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Razão água/finos</td> <td>0,259</td> </tr> </tbody> </table>			Massa total, em g	3338,5	Razão água/(mat. cimentícios)	0,495	Razão água/cimento	0,589	Razão água/finos	0,259																																																									
Massa total, em kg	2086,6																																																																													
Razão água/(mat. cimentícios)	0,495																																																																													
Razão água/cimento	0,589																																																																													
Razão água/finos	0,259																																																																													
Massa total, em g	3338,5																																																																													
Razão água/(mat. cimentícios)	0,495																																																																													
Razão água/cimento	0,589																																																																													
Razão água/finos	0,259																																																																													

Tabela A.2.4 - Composição da argamassa Amostra4.FCCV.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS						
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos			Data	
Amostra4.FCCV.0,80		40C1+50FC+10CV+30ARCF			11-07-2014	
Parâmetros da composição						
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%				
0,800	0,735	0,385				
Composição da mistura de finos						
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg	
0,40	0,00	0,10	0,00	0,50	0,00	
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³						
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg	
3140	3040	2380	2170	2720	2650	
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³						
δs1	δs2	δs3	---	---	---	
2661	2647	2310	---	---	---	
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³						
δsp	---	---	---	---	---	
1050	---	---	---	---	---	
Abertura da malha (mm)						
Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)			
0,50	0,20	0,30				
Percentagem de passados						
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00		
4,000	100,00	99,15	99,91	99,80		
2,000	99,96	92,78	81,92	93,11		
1,000	99,00	68,14	53,70	79,24		
0,500	54,85	20,92	29,46	40,45		
0,250	7,59	1,21	12,90	7,91		
0,125	0,75	0,21	5,47	2,06		
0,063	0,22	0,03	1,43	0,55		
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00		
Módulos de finura						
2,379	3,176	3,166	2,774			
δp= 2854,00kg/m ³ vsp/vp= 0,010465m ³ /m ³ vp= 0,333838m ³ /m ³ vwe= 0,245371m ³ /m ³ vspe= 0,003494m ³ /m ³ vs= 0,417298m ³ /m ³						
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros			
C1= 419,3kg	<u>Massa total, em kg</u>		C1= 670,9g	<u>Massa total, em g</u>		
C2= 0,0kg	1977,9		C2= 0,0g	3164,7		
CV= 79,5kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>		CV= 127,1g	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>		
MS= 0,0kg	0,492		MS= 0,0g	0,492		
FC= 454,0kg	<u>Razão água/cimento</u>		FC= 726,4g	<u>Razão água/cimento</u>		
FG= 0,0kg	0,585		FG= 0,0g	0,585		
W= 245,4litros	<u>Razão água/finos</u>		W= 392,6ml	<u>Razão água/finos</u>		
Sp= 3,49litros	0,258		Sp= 5,59ml	0,258		
S1= 555,2kg			S1= 888,3g			
S2= 220,9kg			S2= 353,5g			
S3= 289,2kg			S3= 462,7g			

Tabela A.2.5 - Composição da argamassa Amostra5.FCCV.0,80.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS																																																																													
Identificação da argamassa Amostra5.FCCV.0,80		Identificação da mistura de finos 40C1+50FC+10CV+40ARCF		Data 11-07-2014																																																																									
Parâmetros da composição																																																																													
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%																																																																											
0,800	0,730	0,390																																																																											
Composição da mistura de finos																																																																													
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg																																																																								
0,40	0,00	0,10	0,00	0,50	0,00																																																																								
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³																																																																													
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg																																																																								
3140	3040	2380	2170	2720	2650																																																																								
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³																																																																													
δs1	δs2	δs3	---	---	---																																																																								
2661	2647	2310	---	---	---																																																																								
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³																																																																													
δsp	---	---	---	---	---																																																																								
1050	---	---	---	---	---																																																																								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="border: 1px solid black;">Abertura da malha (mm)</th> <th style="border: 1px solid black;">Areia0/2 a1</th> <th style="border: 1px solid black;">Areia0/4 a2</th> <th style="border: 1px solid black;">Areia05 a3</th> <th style="border: 1px solid black;">Mistura (Curva Real)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="5" style="border: 1px solid black;">Percentagem de passados</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">8,000</td> <td style="border: 1px solid black;">100,00</td> <td style="border: 1px solid black;">100,00</td> <td style="border: 1px solid black;">100,00</td> <td style="border: 1px solid black;">100,00</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">4,000</td> <td style="border: 1px solid black;">100,00</td> <td style="border: 1px solid black;">99,15</td> <td style="border: 1px solid black;">99,91</td> <td style="border: 1px solid black;">99,88</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">2,000</td> <td style="border: 1px solid black;">99,96</td> <td style="border: 1px solid black;">92,78</td> <td style="border: 1px solid black;">81,92</td> <td style="border: 1px solid black;">92,03</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">1,000</td> <td style="border: 1px solid black;">99,00</td> <td style="border: 1px solid black;">68,14</td> <td style="border: 1px solid black;">53,70</td> <td style="border: 1px solid black;">77,79</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0,500</td> <td style="border: 1px solid black;">54,85</td> <td style="border: 1px solid black;">20,92</td> <td style="border: 1px solid black;">29,46</td> <td style="border: 1px solid black;">41,30</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0,250</td> <td style="border: 1px solid black;">7,59</td> <td style="border: 1px solid black;">1,21</td> <td style="border: 1px solid black;">12,90</td> <td style="border: 1px solid black;">9,08</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0,125</td> <td style="border: 1px solid black;">0,75</td> <td style="border: 1px solid black;">0,21</td> <td style="border: 1px solid black;">5,47</td> <td style="border: 1px solid black;">2,58</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0,063</td> <td style="border: 1px solid black;">0,22</td> <td style="border: 1px solid black;">0,03</td> <td style="border: 1px solid black;">1,43</td> <td style="border: 1px solid black;">0,69</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Resíduo</td> <td style="border: 1px solid black;">0,00</td> <td style="border: 1px solid black;">0,00</td> <td style="border: 1px solid black;">0,00</td> <td style="border: 1px solid black;">0,00</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="border: 1px solid black;">Módulos de finura</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;"></td> <td style="border: 1px solid black;">2,379</td> <td style="border: 1px solid black;">3,176</td> <td style="border: 1px solid black;">3,166</td> <td style="border: 1px solid black;">2,773</td> </tr> </tbody> </table>						Abertura da malha (mm)	Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)	Percentagem de passados					8,000	100,00	100,00	100,00	100,00	4,000	100,00	99,15	99,91	99,88	2,000	99,96	92,78	81,92	92,03	1,000	99,00	68,14	53,70	77,79	0,500	54,85	20,92	29,46	41,30	0,250	7,59	1,21	12,90	9,08	0,125	0,75	0,21	5,47	2,58	0,063	0,22	0,03	1,43	0,69	Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	Módulos de finura						2,379	3,176	3,166	2,773							
Abertura da malha (mm)	Areia0/2 a1	Areia0/4 a2	Areia05 a3	Mistura (Curva Real)																																																																									
Percentagem de passados																																																																													
8,000	100,00	100,00	100,00	100,00																																																																									
4,000	100,00	99,15	99,91	99,88																																																																									
2,000	99,96	92,78	81,92	92,03																																																																									
1,000	99,00	68,14	53,70	77,79																																																																									
0,500	54,85	20,92	29,46	41,30																																																																									
0,250	7,59	1,21	12,90	9,08																																																																									
0,125	0,75	0,21	5,47	2,58																																																																									
0,063	0,22	0,03	1,43	0,69																																																																									
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00																																																																									
Módulos de finura																																																																													
	2,379	3,176	3,166	2,773																																																																									
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="border: 1px solid black;">δp=</td> <td style="border: 1px solid black;">2854,00kg/m³</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Vsp/Vp=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,010601m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Vp=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,334381m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Vw=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,244098m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Vsp=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,003545m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Vs=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,417976m³/m³</td> </tr> </tbody> </table>						δp=	2854,00kg/m ³	Vsp/Vp=	0,010601m ³ /m ³	Vp=	0,334381m ³ /m ³	Vw=	0,244098m ³ /m ³	Vsp=	0,003545m ³ /m ³	Vs=	0,417976m ³ /m ³																																																												
δp=	2854,00kg/m ³																																																																												
Vsp/Vp=	0,010601m ³ /m ³																																																																												
Vp=	0,334381m ³ /m ³																																																																												
Vw=	0,244098m ³ /m ³																																																																												
Vsp=	0,003545m ³ /m ³																																																																												
Vs=	0,417976m ³ /m ³																																																																												
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td colspan="3" style="border: 1px solid black;">Quantidades para um volume de: 1000,00 litros</td> <td colspan="3" style="border: 1px solid black;">Quantidades para um volume de: 1,60 litros</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">C1=</td> <td style="border: 1px solid black;">420,0lg</td> <td style="border: 1px solid black;">Massa total, em kg</td> <td style="border: 1px solid black;">C1=</td> <td style="border: 1px solid black;">672,0g</td> <td style="border: 1px solid black;">Massa total, em g</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">C2=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,0lg</td> <td style="border: 1px solid black;">1868,9</td> <td style="border: 1px solid black;">C2=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,0g</td> <td style="border: 1px solid black;">2990,2</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">CV=</td> <td style="border: 1px solid black;">79,6lg</td> <td style="border: 1px solid black;">Razão água/(mat. cimentícios)</td> <td style="border: 1px solid black;">CV=</td> <td style="border: 1px solid black;">127,3g</td> <td style="border: 1px solid black;">Razão água/(mat. cimentícios)</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">MS=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,0lg</td> <td style="border: 1px solid black;">0,489</td> <td style="border: 1px solid black;">MS=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,0g</td> <td style="border: 1px solid black;">0,489</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">FC=</td> <td style="border: 1px solid black;">454,8lg</td> <td style="border: 1px solid black;">Razão água/cimento</td> <td style="border: 1px solid black;">FC=</td> <td style="border: 1px solid black;">727,6g</td> <td style="border: 1px solid black;">Razão água/cimento</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">FG=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,0lg</td> <td style="border: 1px solid black;">0,581</td> <td style="border: 1px solid black;">FG=</td> <td style="border: 1px solid black;">0,0g</td> <td style="border: 1px solid black;">0,581</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">W=</td> <td style="border: 1px solid black;">244,1litros</td> <td style="border: 1px solid black;">Razão água/finos</td> <td style="border: 1px solid black;">W=</td> <td style="border: 1px solid black;">390,6ml</td> <td style="border: 1px solid black;">Razão água/finos</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Sp=</td> <td style="border: 1px solid black;">3,54litros</td> <td style="border: 1px solid black;">0,256</td> <td style="border: 1px solid black;">Sp=</td> <td style="border: 1px solid black;">5,67ml</td> <td style="border: 1px solid black;">0,256</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">S1=</td> <td style="border: 1px solid black;">556,1lg</td> <td style="border: 1px solid black;"></td> <td style="border: 1px solid black;">S1=</td> <td style="border: 1px solid black;">889,8g</td> <td style="border: 1px solid black;"></td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">S2=</td> <td style="border: 1px solid black;">110,6lg</td> <td style="border: 1px solid black;"></td> <td style="border: 1px solid black;">S2=</td> <td style="border: 1px solid black;">177,0g</td> <td style="border: 1px solid black;"></td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">S3=</td> <td style="border: 1px solid black;">386,2lg</td> <td style="border: 1px solid black;"></td> <td style="border: 1px solid black;">S3=</td> <td style="border: 1px solid black;">617,9g</td> <td style="border: 1px solid black;"></td> </tr> </tbody> </table>						Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros			C1=	420,0lg	Massa total, em kg	C1=	672,0g	Massa total, em g	C2=	0,0lg	1868,9	C2=	0,0g	2990,2	CV=	79,6lg	Razão água/(mat. cimentícios)	CV=	127,3g	Razão água/(mat. cimentícios)	MS=	0,0lg	0,489	MS=	0,0g	0,489	FC=	454,8lg	Razão água/cimento	FC=	727,6g	Razão água/cimento	FG=	0,0lg	0,581	FG=	0,0g	0,581	W=	244,1litros	Razão água/finos	W=	390,6ml	Razão água/finos	Sp=	3,54litros	0,256	Sp=	5,67ml	0,256	S1=	556,1lg		S1=	889,8g		S2=	110,6lg		S2=	177,0g		S3=	386,2lg		S3=	617,9g	
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros																																																																										
C1=	420,0lg	Massa total, em kg	C1=	672,0g	Massa total, em g																																																																								
C2=	0,0lg	1868,9	C2=	0,0g	2990,2																																																																								
CV=	79,6lg	Razão água/(mat. cimentícios)	CV=	127,3g	Razão água/(mat. cimentícios)																																																																								
MS=	0,0lg	0,489	MS=	0,0g	0,489																																																																								
FC=	454,8lg	Razão água/cimento	FC=	727,6g	Razão água/cimento																																																																								
FG=	0,0lg	0,581	FG=	0,0g	0,581																																																																								
W=	244,1litros	Razão água/finos	W=	390,6ml	Razão água/finos																																																																								
Sp=	3,54litros	0,256	Sp=	5,67ml	0,256																																																																								
S1=	556,1lg		S1=	889,8g																																																																									
S2=	110,6lg		S2=	177,0g																																																																									
S3=	386,2lg		S3=	617,9g																																																																									

Anexo B

ESTUDOS REOLÓGICOS DAS ARGAMASSAS

Anexo B.1

REOLOGIA DAS ARGAMASSAS - SÉRIE 1 CORRIGIDA

Tabela B.1.1 - Leituras dos ensaios empíricos das argamassas corrigidas da Série 1.

Série 1 Corrigida				
Designação da argamassa	Ensaio Espalhamento			Ensaio Fluides
	d1 [mm]	d2 [mm]	D _m [mm]	t [s]
Amostra1.FC.0,80	298	297	297,5	4,57
Amostra2.FC.0,80	295	293	294,0	4,22
Amostra3.FC.0,80	188	189	188,5	9,40
Amostra4.FC.0,80	210	208	209,0	6,80
Amostra5.FC.0,80	235	228	231,5	5,82
Amostra6.FC.0,80	133	134	133,5	16,12

Tabela B.1.2 - Parâmetros reológicos das argamassas corrigidas da Série 1.

Série 1 Corrigida							
Designação da argamassa	Parâmetros da mistura			Parâmetros reológicos da argamassa observados			Classificação do material
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Tensão de cedência (τ_0) [Nmm]	Índice de consistência (k)	Fator Não Newtoniano (n)	
Amostra1.FC.0,80	0,80	0,70	0,34	1,45	0,09	1,16	Dilatante
Amostra2.FC.0,80	0,80	0,71	0,33	2,07	0,19	1,02	Plástico de Bingham
Amostra3.FC.0,80	0,80	0,71	0,335	10,89	1,48	0,84	Pseudoplástico
Amostra4.FC.0,80	0,80	0,72	0,335	9,09	0,47	1,02	Plástico de Bingham
Amostra5.FC.0,80	0,80	0,725	0,335	8,05	0,23	1,12	Dilatante
Amostra6.FC.0,80	0,80	0,70	0,335	7,27	22,39	0,43	Pseudoplástico

Tabela B.1.3 - Valores máximos medidos da viscosidade das argamassas corrigidas da Série 1.

Série 1 Corrigida		
Designação da argamassa	Máxima viscosidade medida [N.mm.rpm]	Taxa de deformação correspondente [rpm]
Amostra1.FC.0,80	3127,9	120
Amostra2.FC.0,80	3392,7	120
Amostra3.FC.0,80	12219,5	120
Amostra4.FC.0,80	9015,8	120
Amostra5.FC.0,80	7514,6	118,3
Amostra6.FC.0,80	21358,7	120

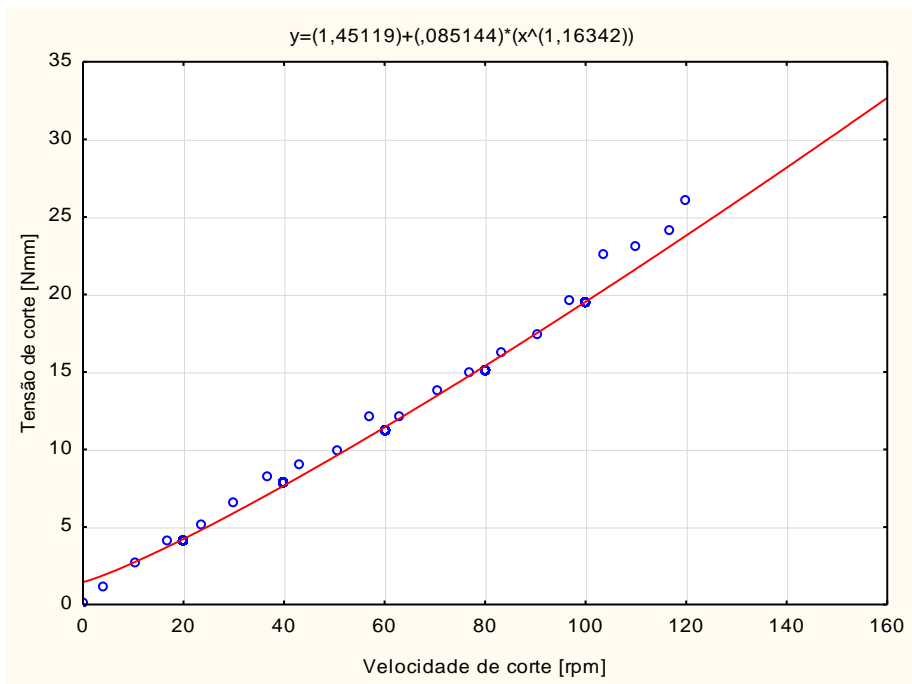


Figura B.1.1 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FC.0,80.

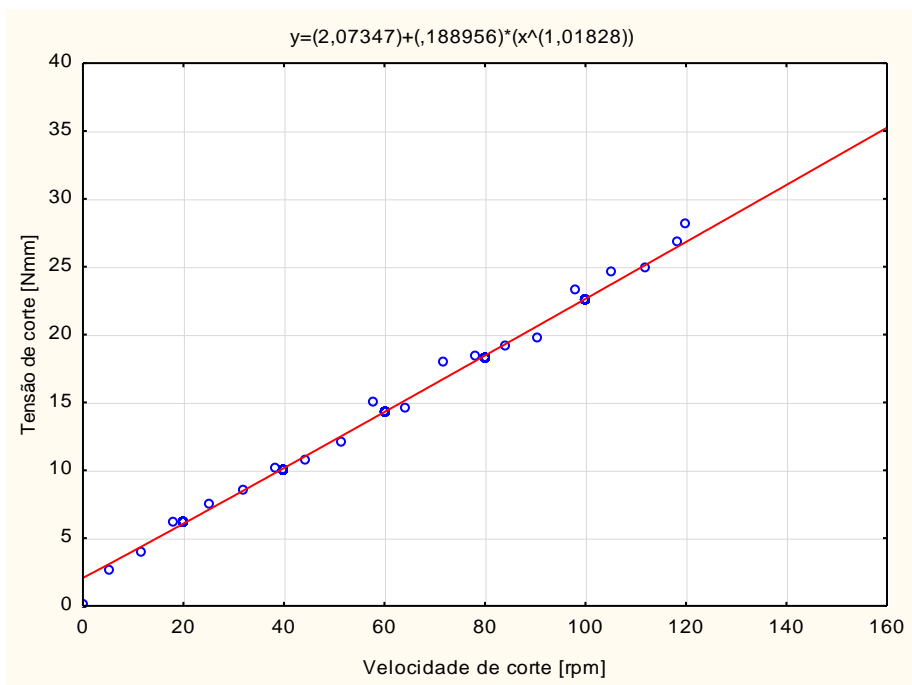


Figura B.1.2 - Curva de escoamento da argamassa Amostra2.FC.0,80.

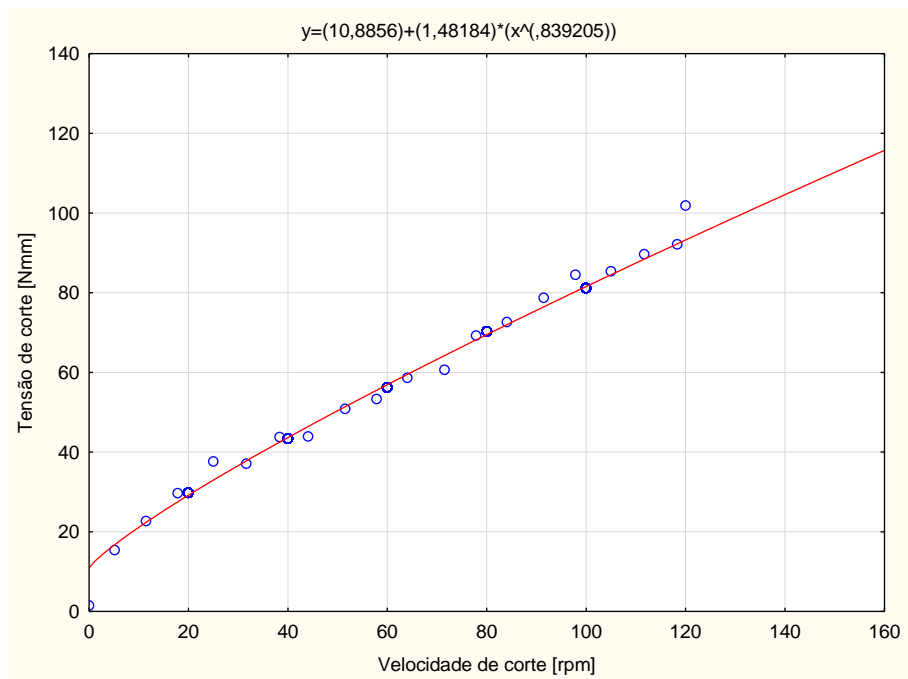


Figura B.1.3 - Curva de escoamento da argamassa Amostra3.FC.0,80.

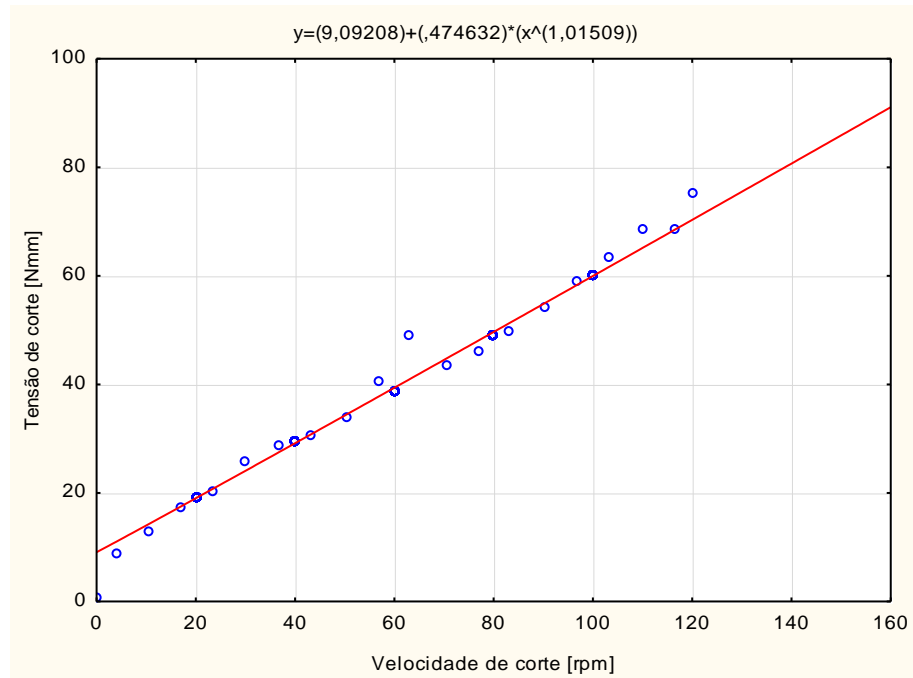


Figura B.1.4 - Curva de escoamento da argamassa Amostra4.FC.0,80.

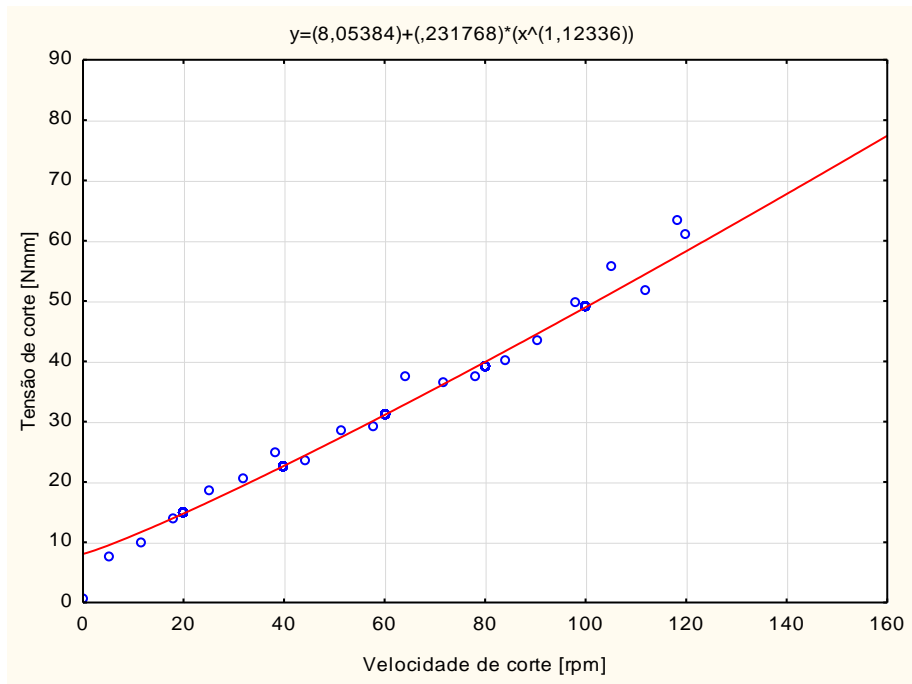


Figura B.1.5 - Curva de escoamento da argamassa Amostra5.FC.0,80.

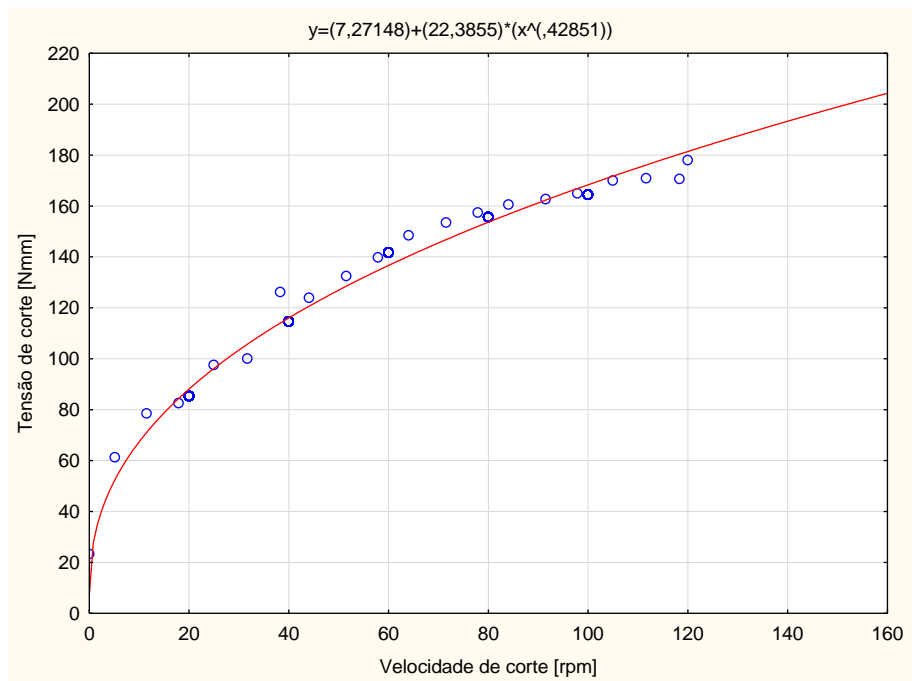


Figura B.1.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra6.FC.0,80.

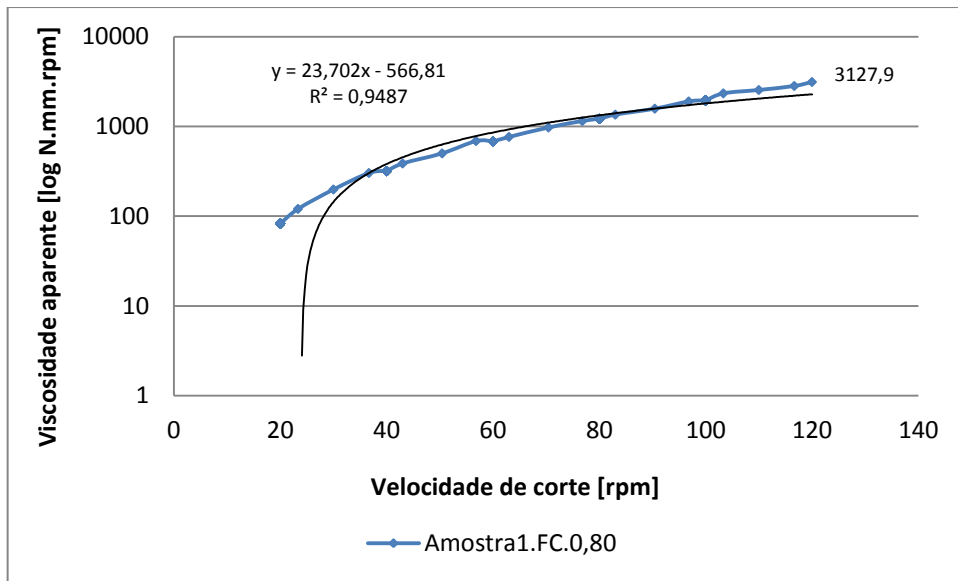


Figura B.1.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FC.0,80 de referência.

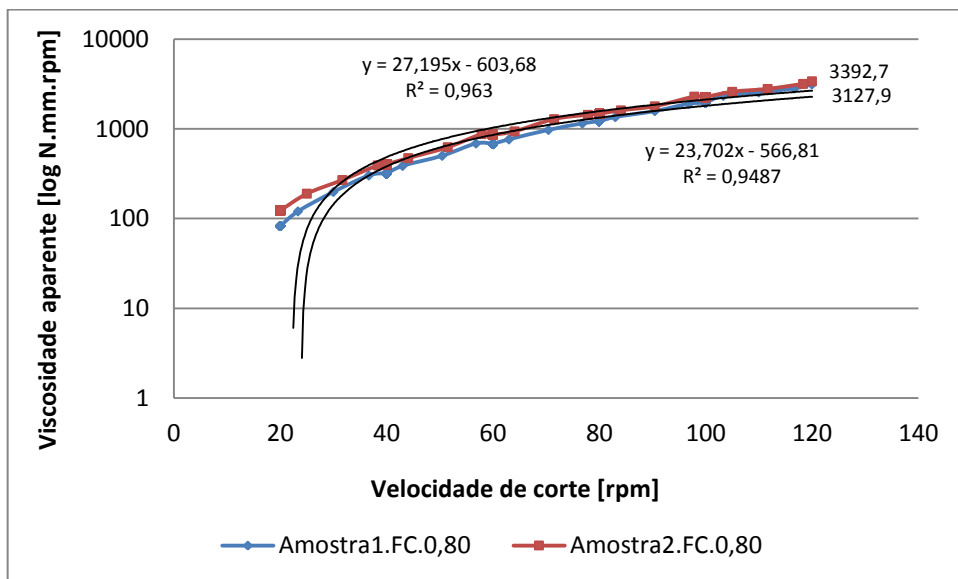


Figura B.1.8 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra2.FC.0,80 e de referência.

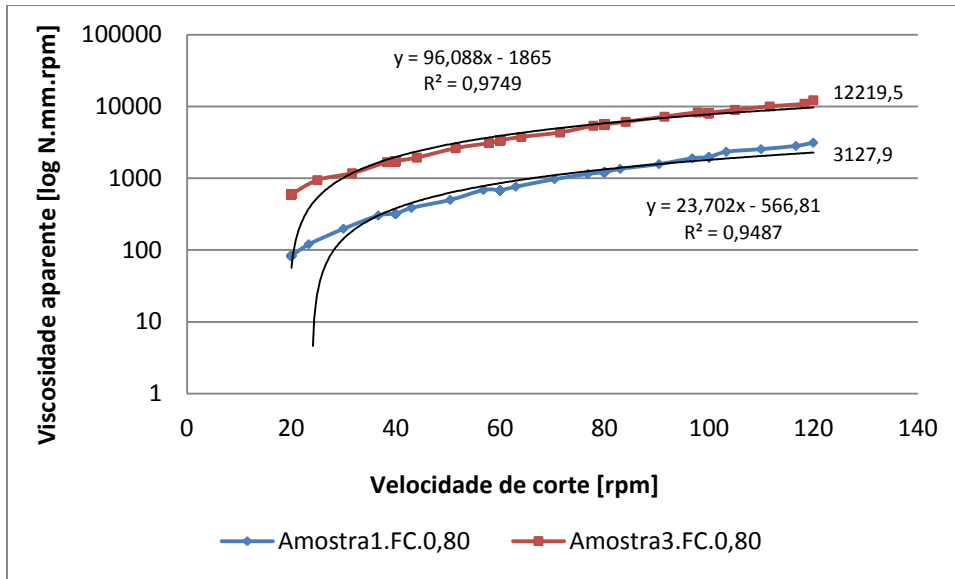


Figura B.1.9 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra3.FC.0,80 e de referência.

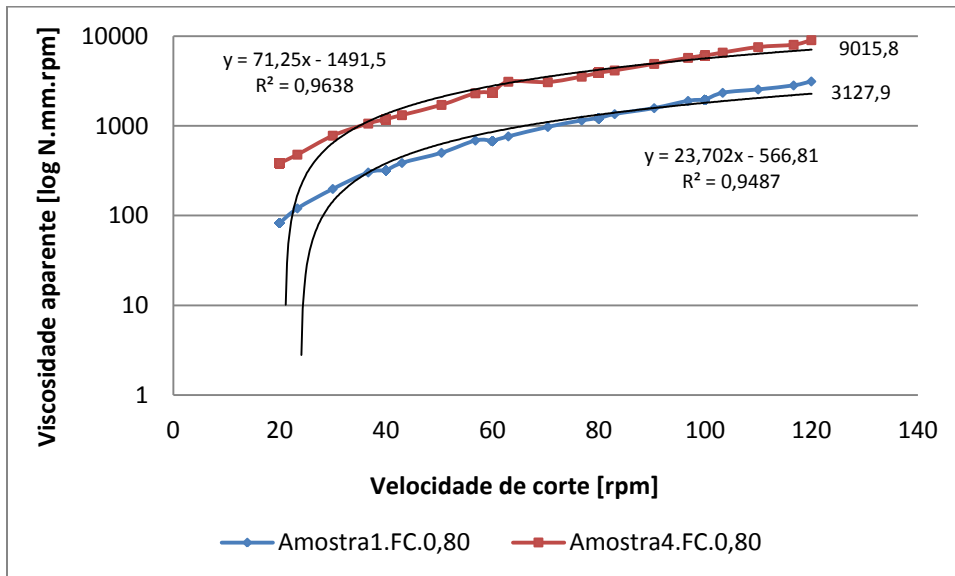


Figura B.1.10 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra4.FC.0,80 e de referência.

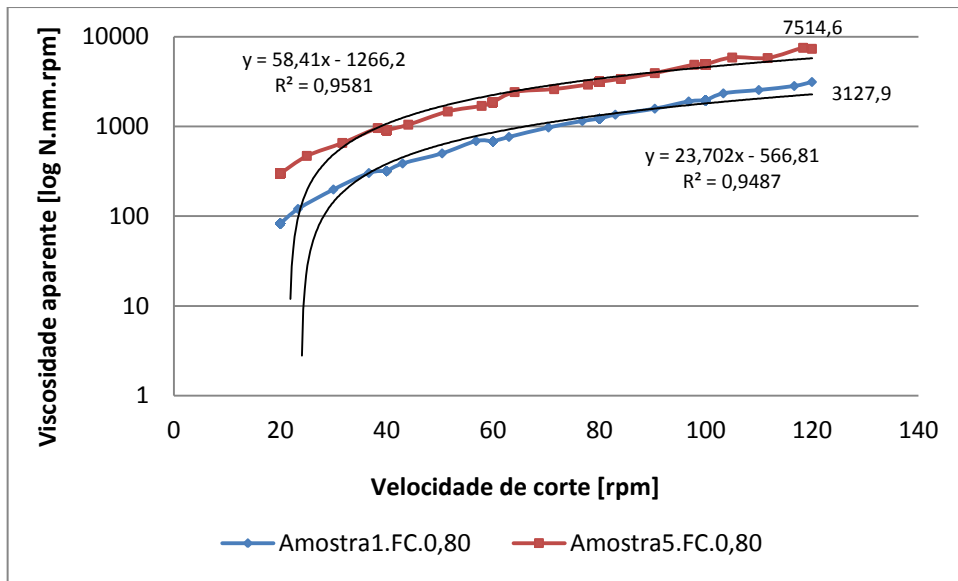


Figura B.1.11 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra5.FC.0,80 e de referência.

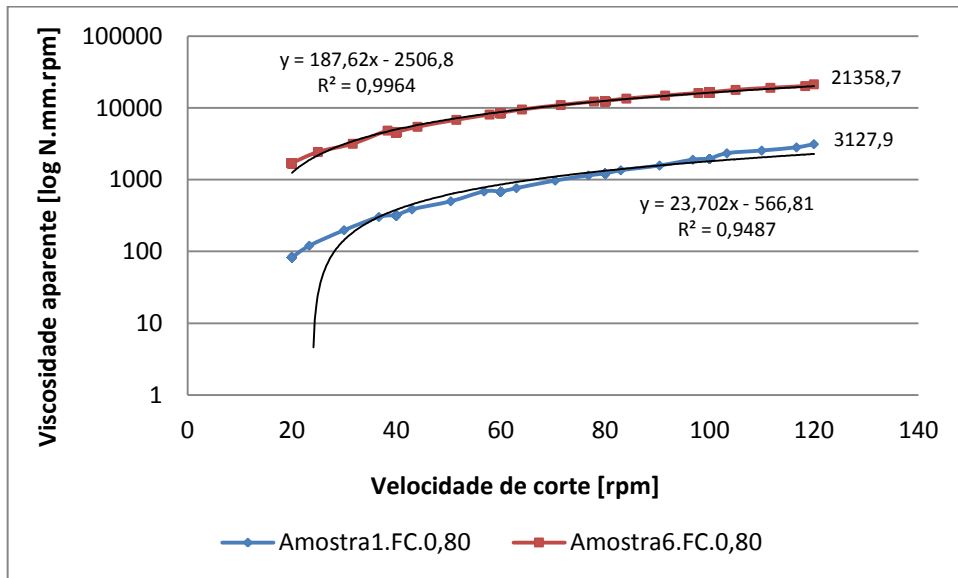


Figura B.1.12 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra6.FC.0,80 e de referência.

Anexo B.2

REOLOGIA DAS ARGAMASSAS - SÉRIE 1 ORIGINAL

Tabela B.2.1 - Leituras dos ensaios empíricos das argamassas originais da Série 1.

Série 1 Original				
Designação da argamassa	Ensaio Espalhamento			Ensaio Fluidez
	d1 [mm]	d2 [mm]	D _m [mm]	t [s]
Amostra1.FC.0,80	298	297	297,5	4,57
Amostra2.FC.0,80.WSpRef	261	265	263,0	4,69
Amostra3.FC.0,80.WSpRef	244	240	242,0	5,73
Amostra4.FC.0,80.WSpRef	214	211	212,5	6,71
Amostra5.FC.0,80.WSpRef	216	213	214,5	7,08
Amostra6.FC.0,80.WSpRef	228	222	225,0	6,06

Tabela B.2.2 - Parâmetros reológicos das argamassas originais da Série 1.

Série 1 Original							
Designação da argamassa	Parâmetros da mistura			Parâmetros reológicos da argamassa observados			Classificação do material
	V _p /V _s	V _w /V _p	Sp/p%	Tensão de cedência (τ ₀) [Nmm]	Índice de consistência (k)	Fator Não Newtoniano (n)	
Amostra1.FC.0,80	0,80	0,70	0,34	1,45	0,09	1,16	Dilatante
Amostra2.FC.0,80.WSpRef	-	-	-	3,38	0,12	1,19	Dilatante
Amostra3.FC.0,80.WSpRef	-	-	-	5,80	0,22	1,14	Dilatante
Amostra4.FC.0,80.WSpRef	-	-	-	9,92	0,29	1,12	Dilatante
Amostra5.FC.0,80.WSpRef	-	-	-	10,49	0,25	1,18	Dilatante
Amostra6.FC.0,80.WSpRef	-	-	-	6,67	0,20	1,16	Dilatante

Tabela B.2.3 - Valores máximos medidos da viscosidade das argamassas originais da Série 1.

Série 1 Original		
Designação da argamassa	Máxima viscosidade medida [N.mm.rpm]	Taxa de deformação correspondente [rpm]
Amostra1.FC.0,80	3127,9	120
Amostra2.FC.0,80.WSpRef	4971,4	120
Amostra3.FC.0,80.WSpRef	7263,3	120
Amostra4.FC.0,80.WSpRef	9227	120
Amostra5.FC.0,80.WSpRef	10427,1	120
Amostra6.FC.0,80.WSpRef	7447,1	120

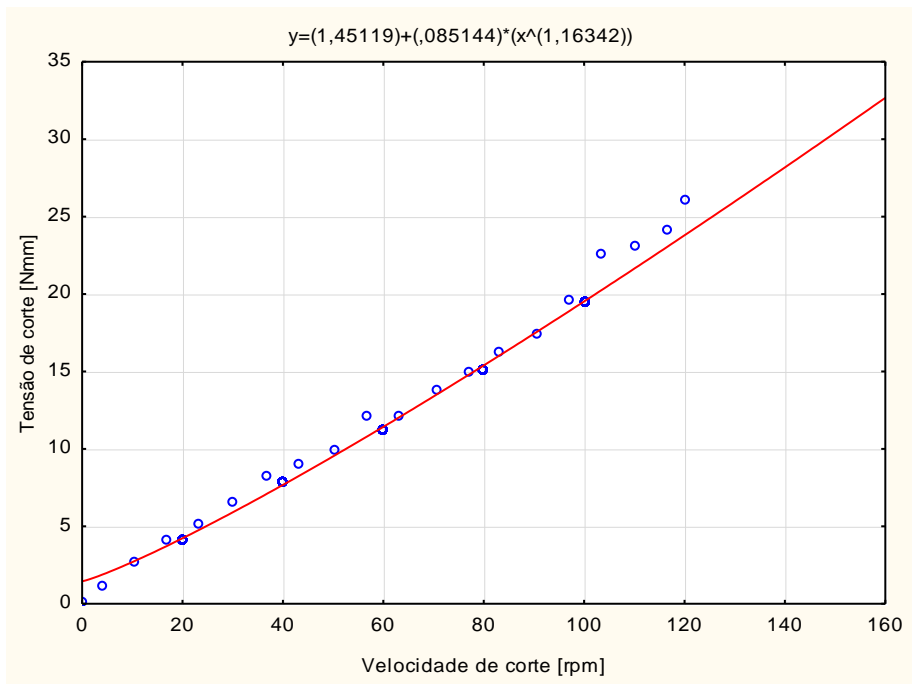


Figura B.2.1 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FC.0,80.

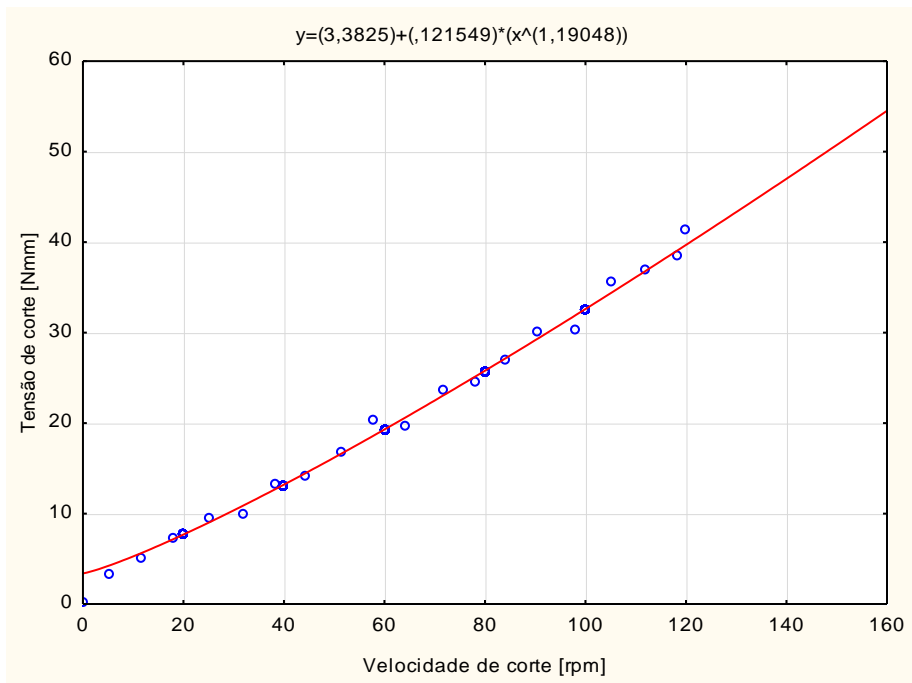


Figura B.2.2 - Curva de escoamento da argamassa Amostra2.FC.0,80.WSpRef.

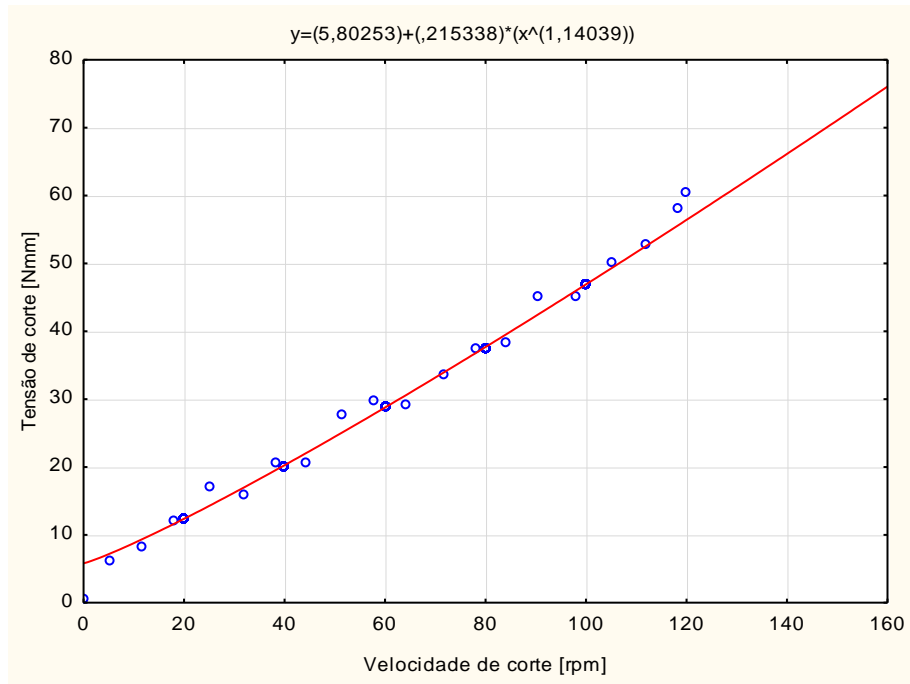


Figura B.2.3 - Curva de escoamento da argamassa Amostra3.FC.0,80.WSpRef.

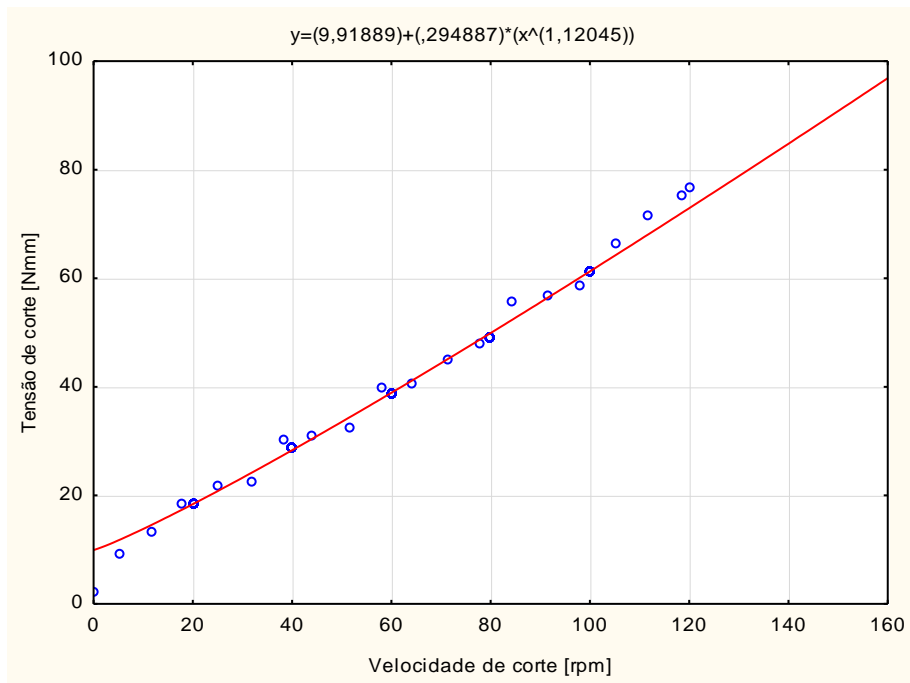


Figura B.2.4 - Curva de escoamento da argamassa Amostra4.FC.0,80.WSpRef.

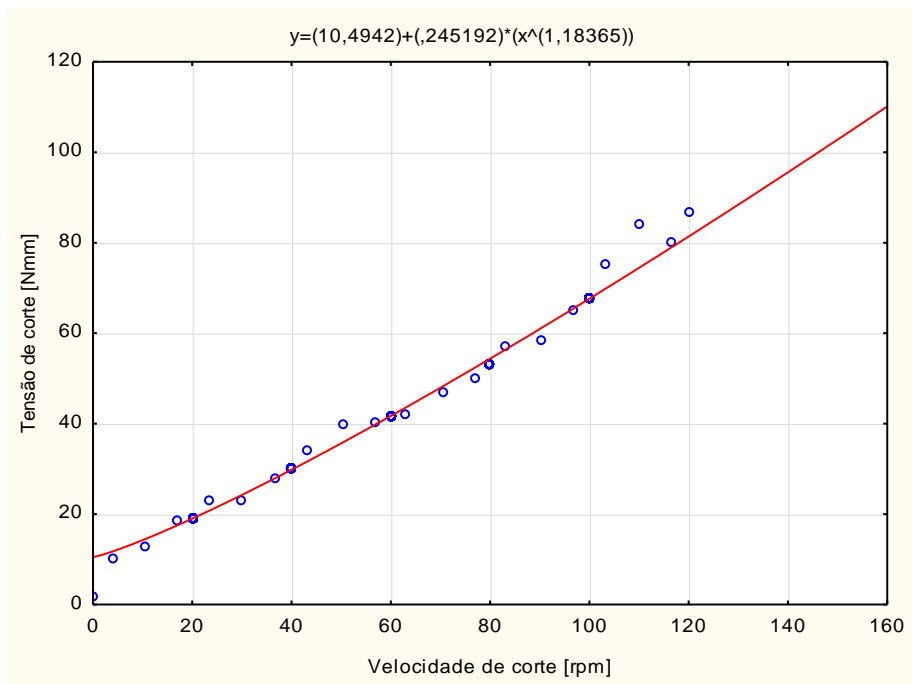


Figura B.2.5 - Curva de escoamento da argamassa Amostra5.FC.0,80.WSpRef.

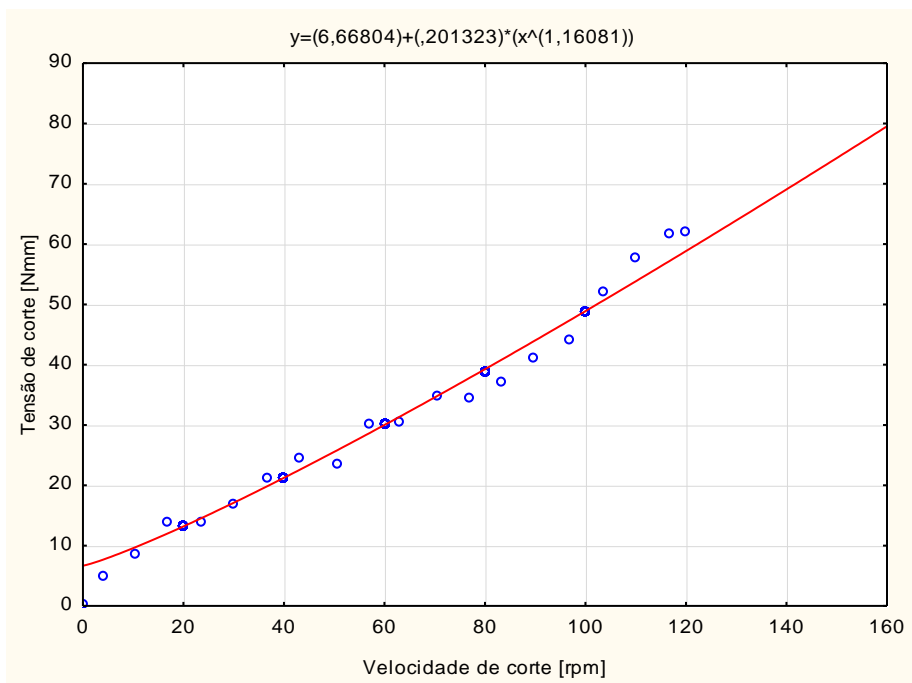


Figura B.2.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra6.FC.0,80.WSpRef.

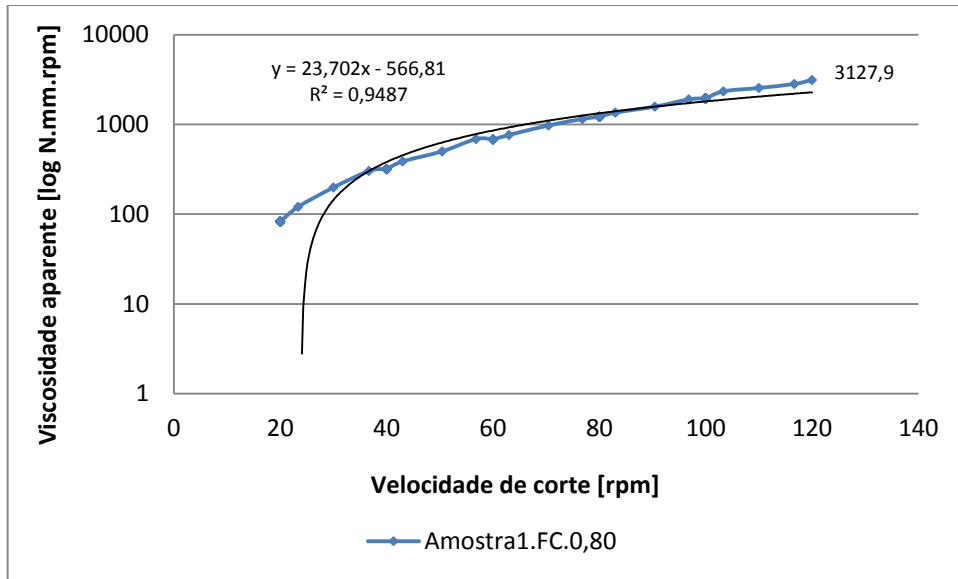


Figura B.2.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FC.0,80 de referência.

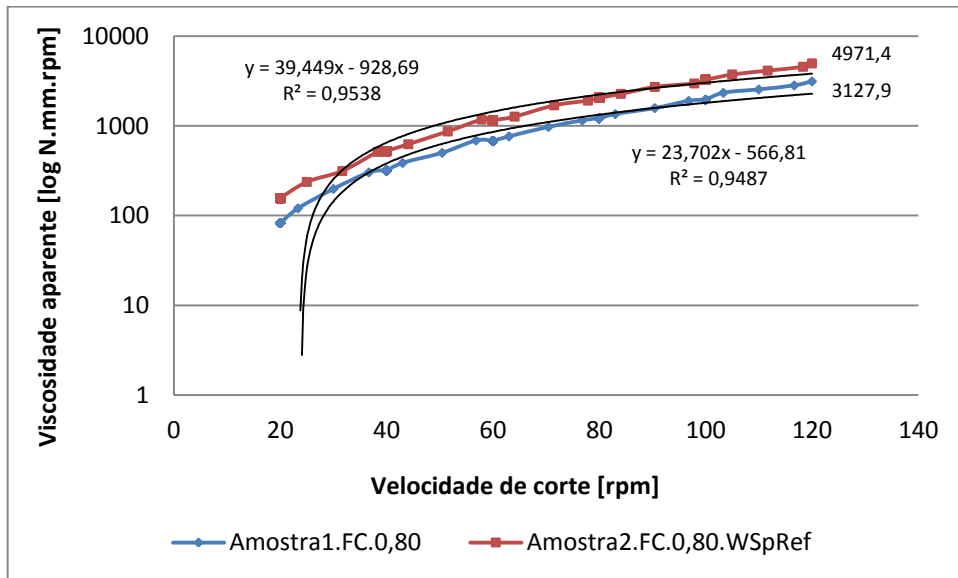


Figura B.2.8 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra2.FC.0,80.WSpRef e de referência.

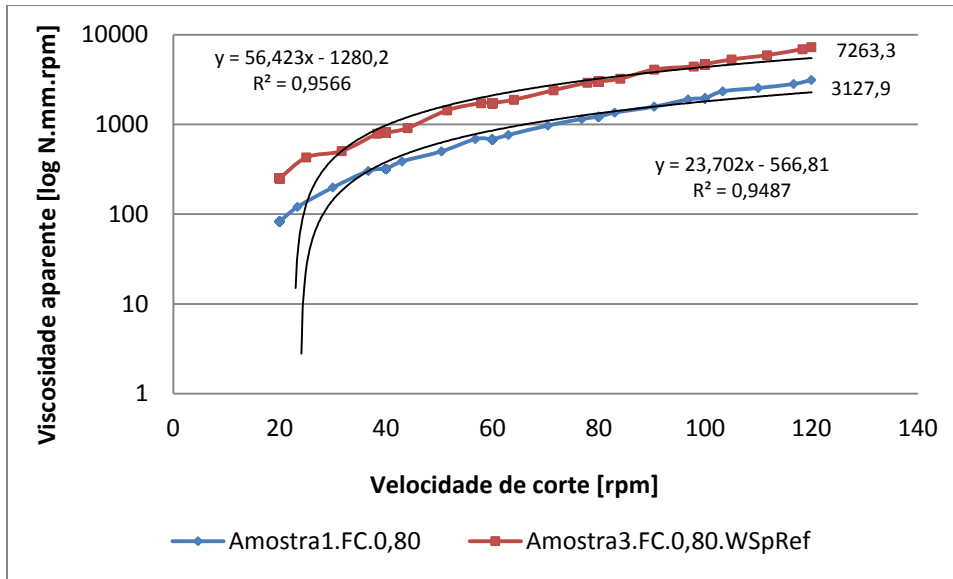


Figura B.2.9 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra3.FC.0,80.WSpRef e de referência.

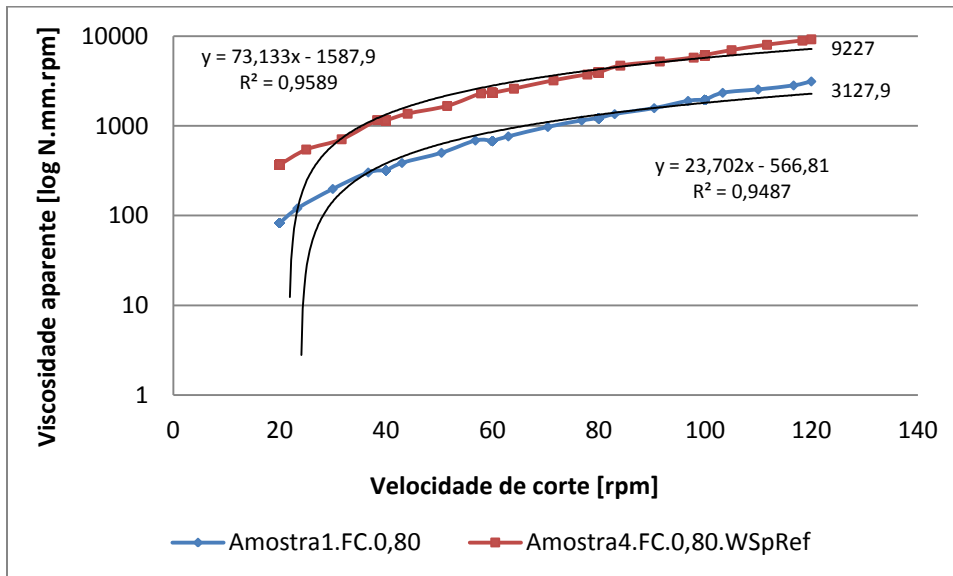


Figura B.2.10 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra4.FC.0,80.WSpRef e de referência.

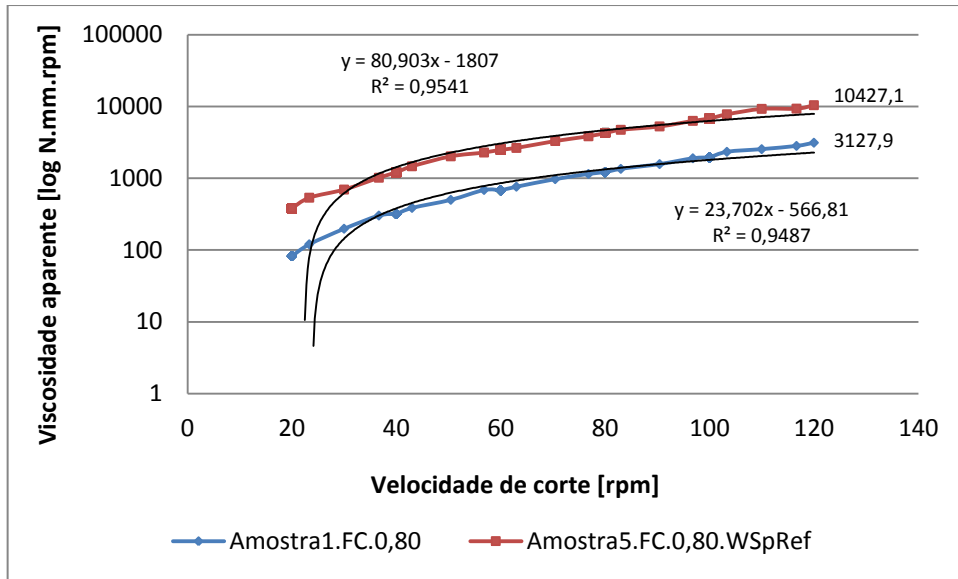


Figura B.2.11 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra5.FC.0,80.WSpRef e de referência.

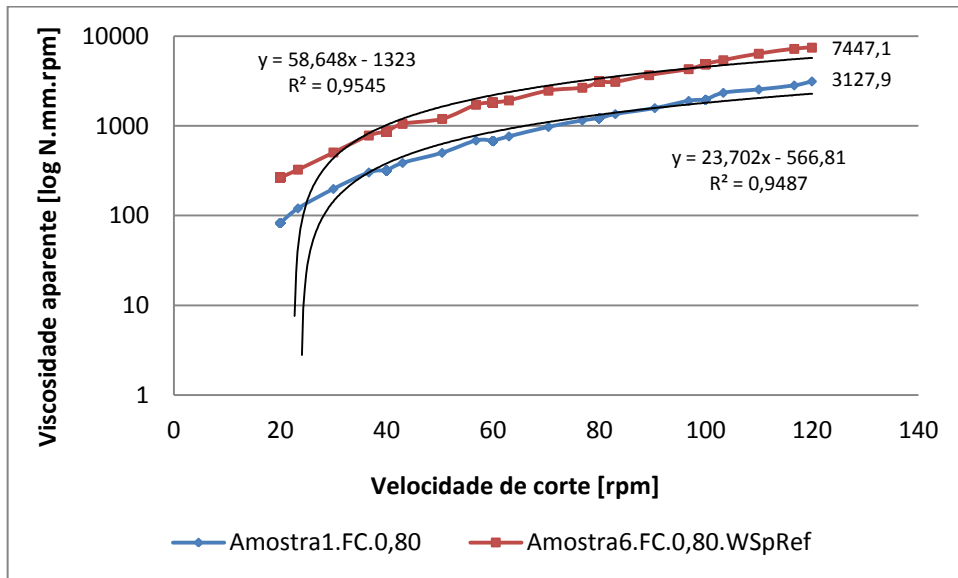


Figura B.2.12 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra6.FC.0,80.WSpRef e de referência.

Anexo B.3

REOLOGIA DAS ARGAMASSAS - SÉRIE 2 CORRIGIDA

Tabela B.3.1 - Leituras dos ensaios empíricos das argamassas corrigidas da Série 2.

Série 2 Corrigida				
Designação da argamassa	Ensaio Espalhamento			Ensaio Fluidez
	d1 [mm]	d2 [mm]	D _m [mm]	t [s]
Amostra1.FCCV.0,80	334	332	333,0	2,44
Amostra2.FCCV.0,80	292	288	290,0	3,43
Amostra3.FCCV.0,80	303	310	306,5	2,85
Amostra4.FCCV.0,80	280	276	278,0	4,31
Amostra5.FCCV.0,80	267	260	263,5	5,14
Amostra6.FCCV.0,80	205	204	204,5	7,62

Tabela B.3.2 - Parâmetros reológicos das argamassas corrigidas da Série 2.

Série 2 Corrigida							
Designação da argamassa	Parâmetros da mistura			Parâmetros reológicos da argamassa observados			Classificação do material
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Tensão de cedência (τ_0) [Nmm]	Índice de consistência (k)	Fator Não Newtoniano (n)	
Amostra1.FCCV.0,80	0,80	0,755	0,385	1,37	0,01	1,38	Dilatante
Amostra2.FCCV.0,80	0,80	0,74	0,385	2,13	0,08	1,18	Dilatante
Amostra3.FCCV.0,80	0,80	0,74	0,385	1,74	0,03	1,31	Dilatante
Amostra4.FCCV.0,80	0,80	0,735	0,385	3,50	0,06	1,31	Dilatante
Amostra5.FCCV.0,80	0,80	0,73	0,39	3,74	0,11	1,23	Dilatante
Amostra6.FCCV.0,80	0,80	0,73	0,39	13,61	0,24	1,19	Dilatante

Tabela B.3.3 - Valores máximos medidos da viscosidade das argamassas corrigidas da Série 2.

Série 2 Corrigida		
Designação da argamassa	Máxima viscosidade medida [N.mm.rpm]	Taxa de deformação correspondente [rpm]
Amostra1.FCCV.0,80	1014,8	120
Amostra2.FCCV.0,80	3326,1	120
Amostra3.FCCV.0,80	2435,2	120
Amostra4.FCCV.0,80	4477	120
Amostra5.FCCV.0,80	5689,1	120
Amostra6.FCCV.0,80	10686,9	120

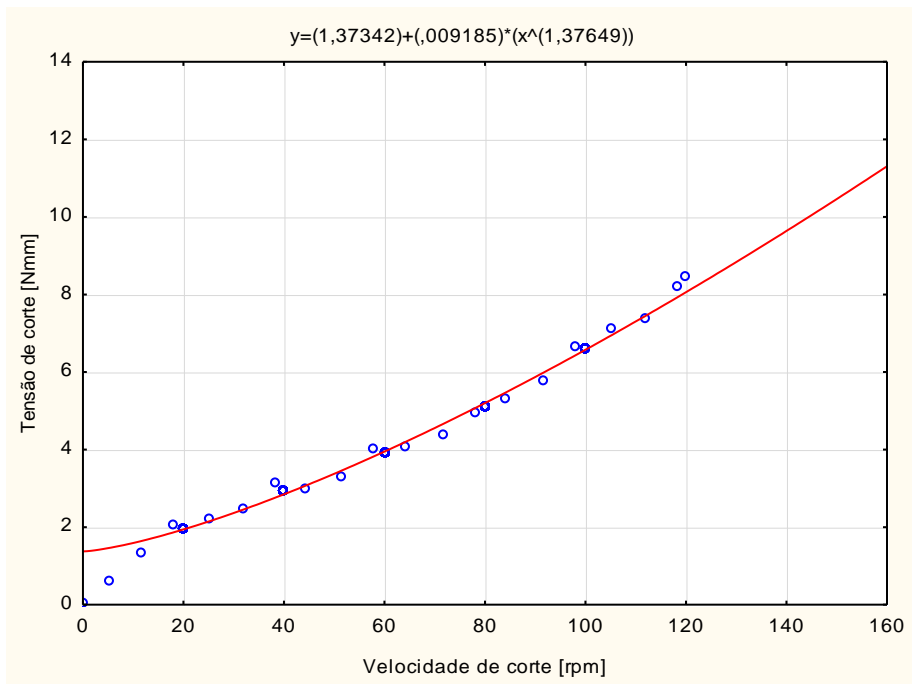


Figura B.3.1 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FCCV.0,80.

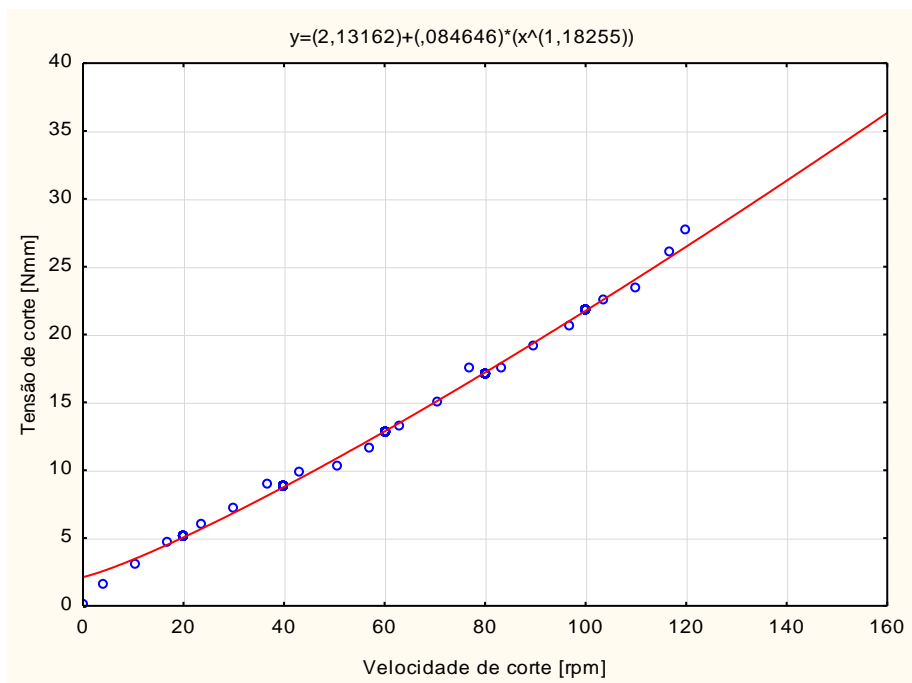


Figura B.3.2 - Curva de escoamento da argamassa Amostra2.FCCV.0,80.

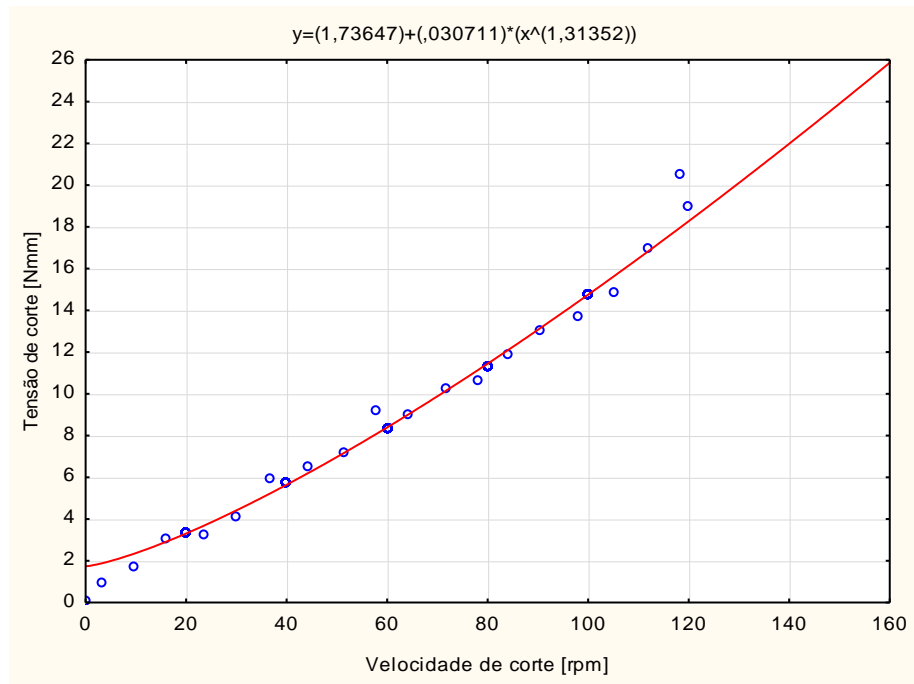


Figura B.3.3 - Curva de escoamento da argamassa Amostra3.FCCV.0,80.

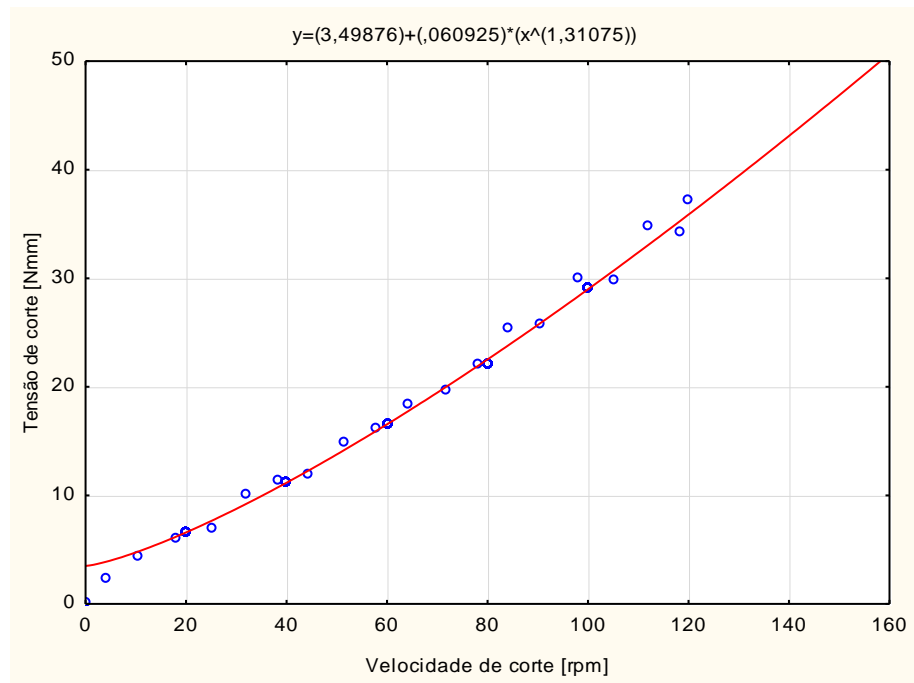


Figura B.3.4 - Curva de escoamento da argamassa Amostra4.FCCV.0,80.

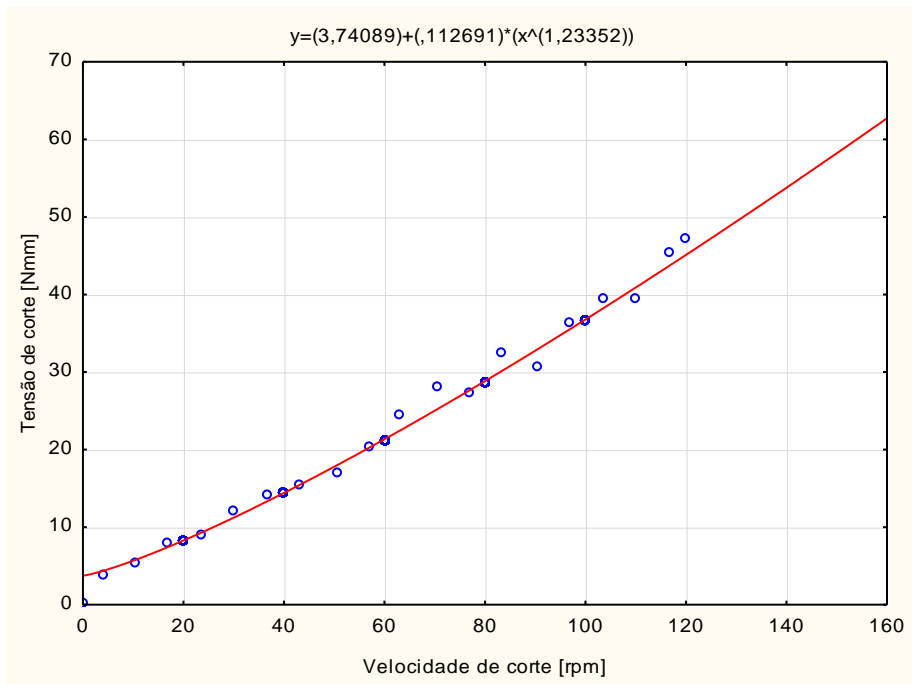


Figura B.3.5 - Curva de escoamento da argamassa Amostra5.FCCV.0,80.

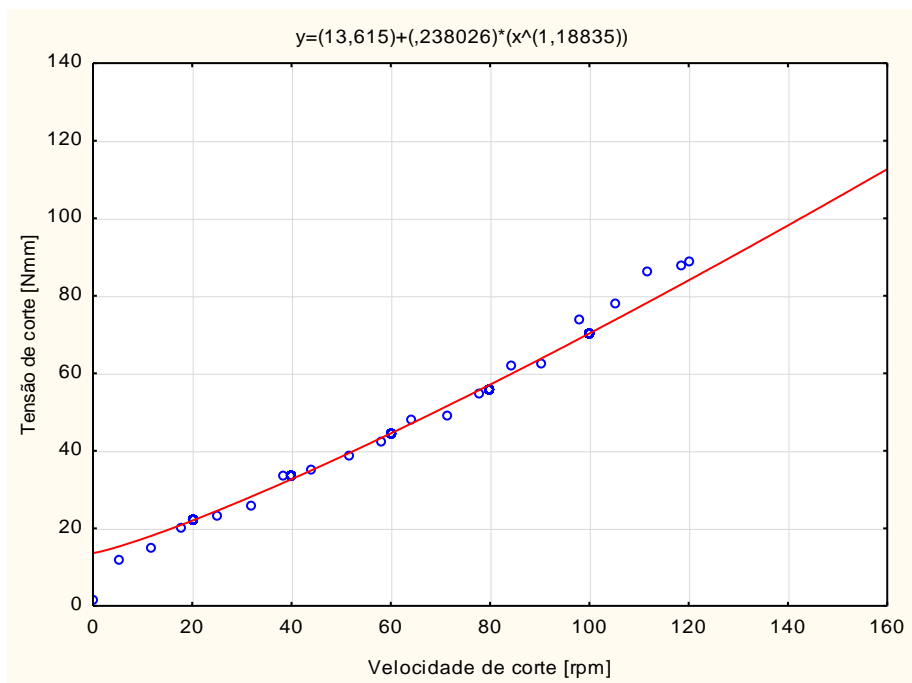


Figura B.3.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra6.FCCV.0,80.

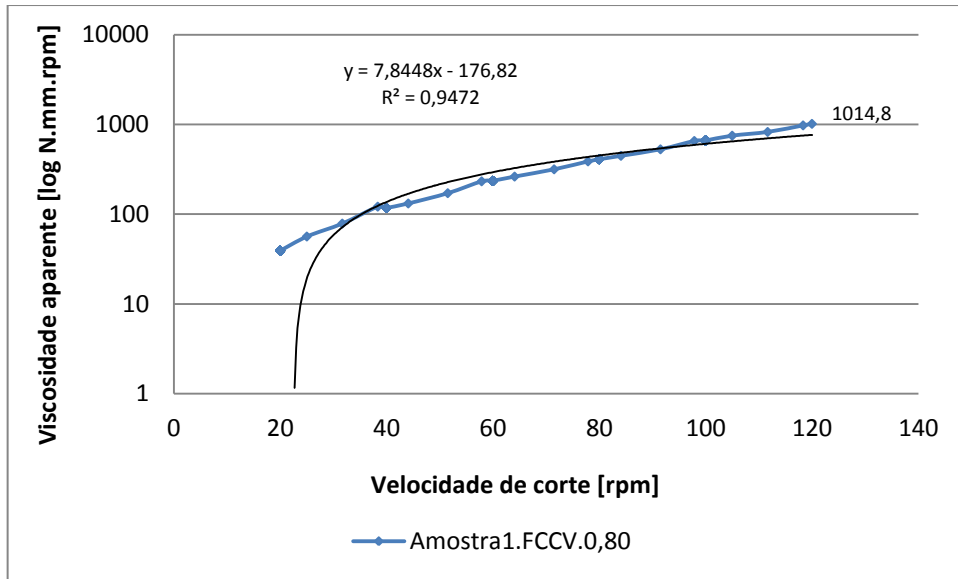


Figura B.3.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FCCV.0,80 de referência.

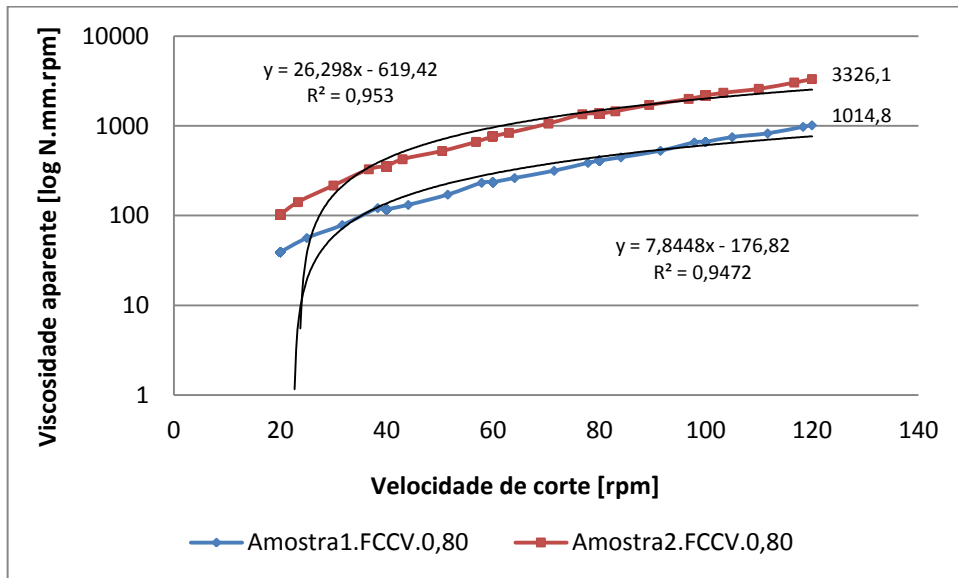


Figura B.3.8 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra2.FCCV.0,80 e de referência.

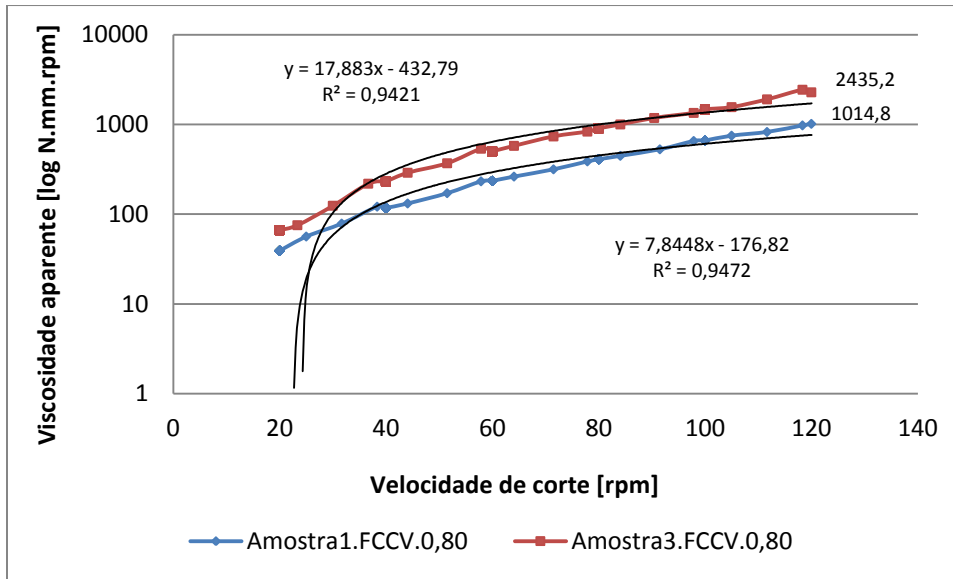


Figura B.3.9 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra3.FCCV.0,80 e de referência.

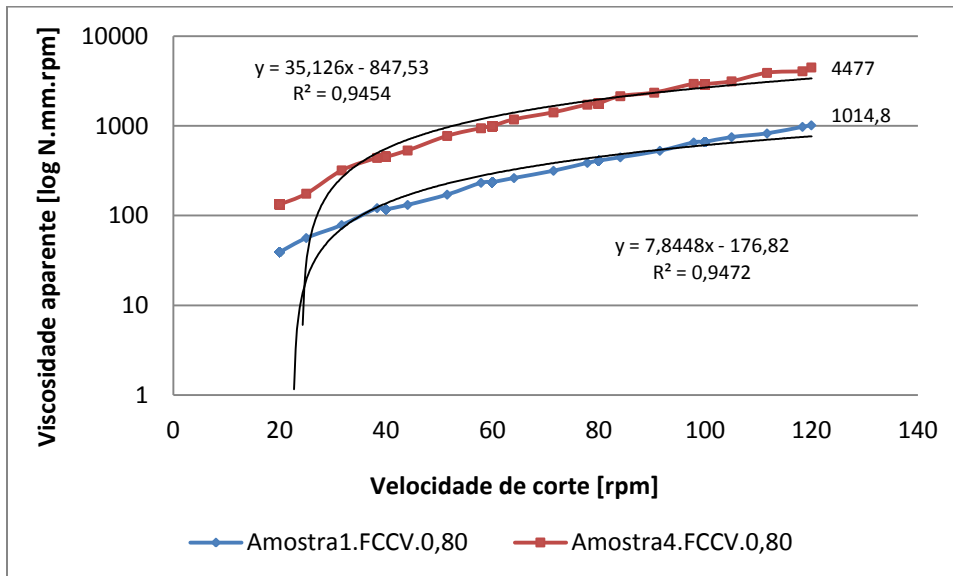


Figura B.3.10 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra4.FCCV.0,80 e de referência.

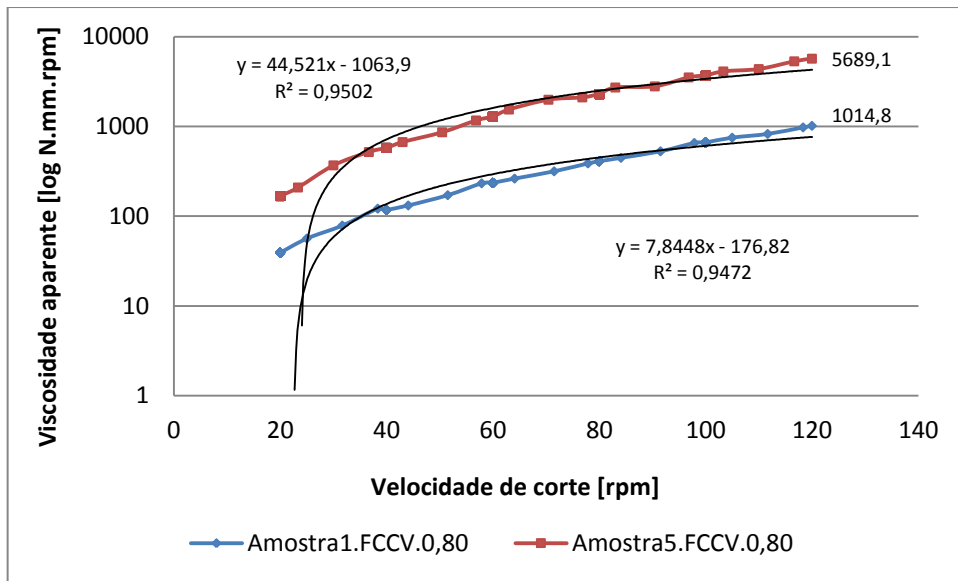


Figura B.3.11 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra5.FCCV.0,80 e de referência.

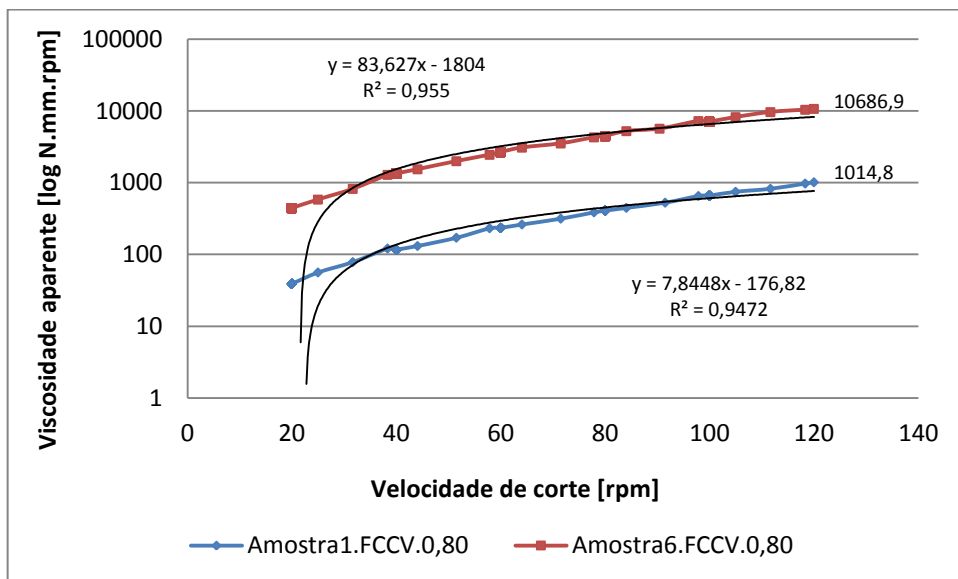


Figura B.3.12 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra6.FCCV.0,80 e de referência.

Anexo B.4

REOLOGIA DAS ARGAMASSAS - SÉRIE 2 ORIGINAL

Tabela B.4.1 - Leituras dos ensaios empíricos das argamassas originais da Série 2.

Série 2 Original				
Designação da argamassa	Ensaio Espalhamento			Ensaio Fluides
	d1 [mm]	d2 [mm]	D _m [mm]	t [s]
Amostra1.FCCV.0,80	334	332	333,0	2,44
Amostra2.FCCV.0,80.WSpRef	325	326	325,5	2,05
Amostra3.FCCV.0,80.WSpRef	324	327	325,5	2,11
Amostra4.FCCV.0,80.WSpRef	305	301	303,0	2,74
Amostra5.FCCV.0,80.WSpRef	289	285	287,0	3,31
Amostra6.FCCV.0,80.WSpRef	288	288	288,0	3,62

Tabela B.4.2 - Parâmetros reológicos das argamassas originais da Série 2.

Série 2 Original							
Designação da argamassa	Parâmetros da mistura			Parâmetros reológicos da argamassa observados			Classificação do material
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Tensão de cedência (τ_0) [Nmm]	Índice de consistência (k)	Fator Não Newtoniano (n)	
Amostra1.FCCV.0,80	0,80	0,755	0,385	1,37	0,01	1,38	Dilatante
Amostra2.FCCV.0,80.WSpRef	-	-	-	1,56	0,03	1,25	Dilatante
Amostra3.FCCV.0,80.WSpRef	-	-	-	1,83	0,00	1,80	Dilatante
Amostra4.FCCV.0,80.WSpRef	-	-	-	2,21	0,03	1,30	Dilatante
Amostra5.FCCV.0,80.WSpRef	-	-	-	2,80	0,08	1,15	Dilatante
Amostra6.FCCV.0,80.WSpRef	-	-	-	2,50	0,05	1,25	Dilatante

Tabela B.4.3 - Valores máximos medidos da viscosidade das argamassas originais da Série 2.

Série 2 Original		
Designação da argamassa	Máxima viscosidade medida [N.mm.rpm]	Taxa de deformação correspondente [rpm]
Amostra1.FCCV.0,80	1014,8	120
Amostra2.FCCV.0,80.WSpRef	1737,8	120
Amostra3.FCCV.0,80.WSpRef	2309,9	116,7
Amostra4.FCCV.0,80.WSpRef	2272,8	120
Amostra5.FCCV.0,80.WSpRef	2855	120
Amostra6.FCCV.0,80.WSpRef	2880,9	116,7

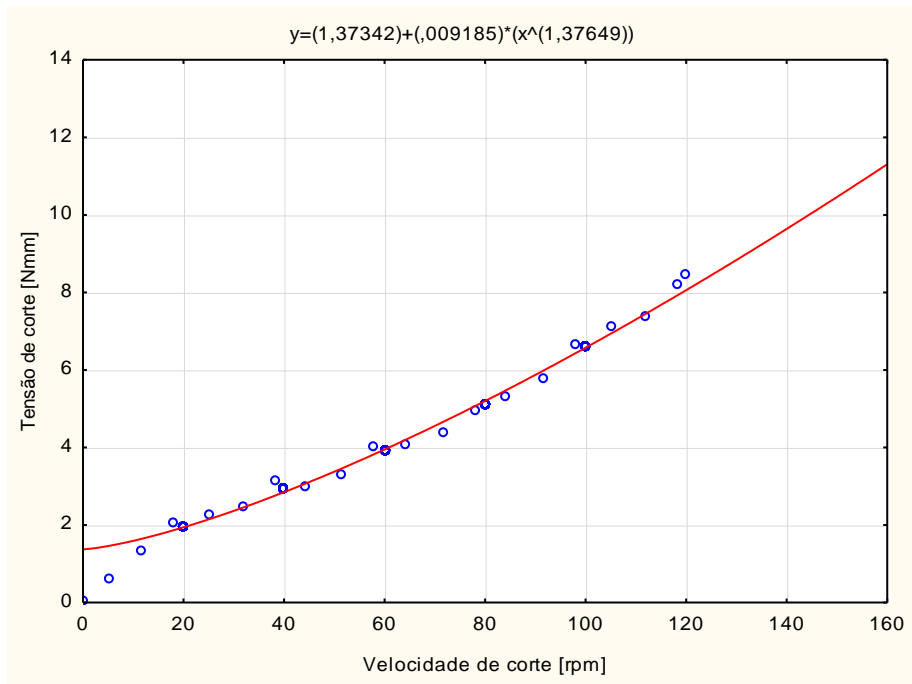


Figura B.4.1 - Curva de escoamento da argamassa Amostra1.FCCV.0,80.

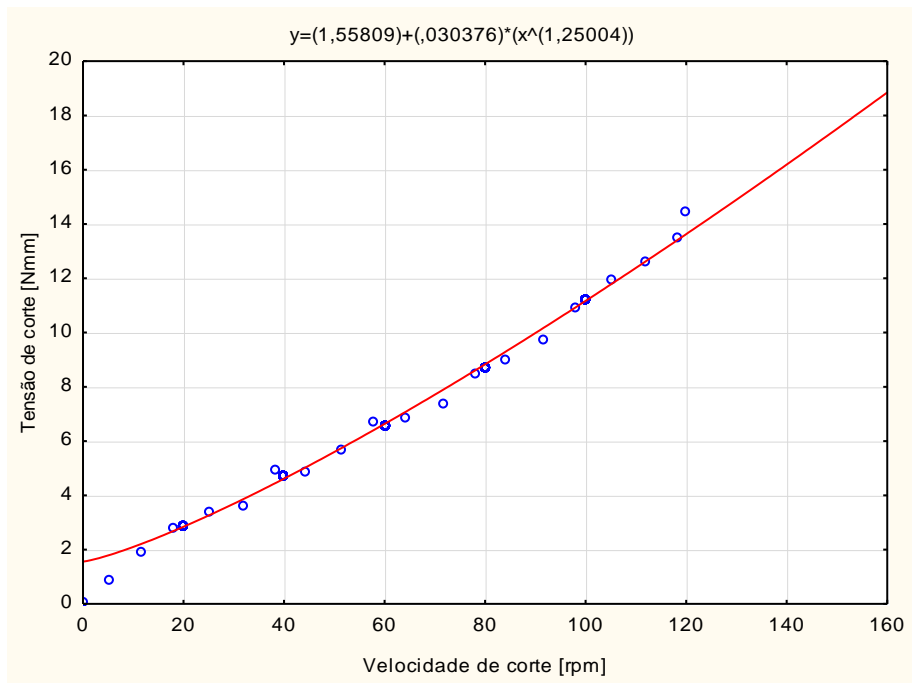


Figura B.4.2 - Curva de escoamento da argamassa Amostra2.FCCV.0,80.WSpRef.

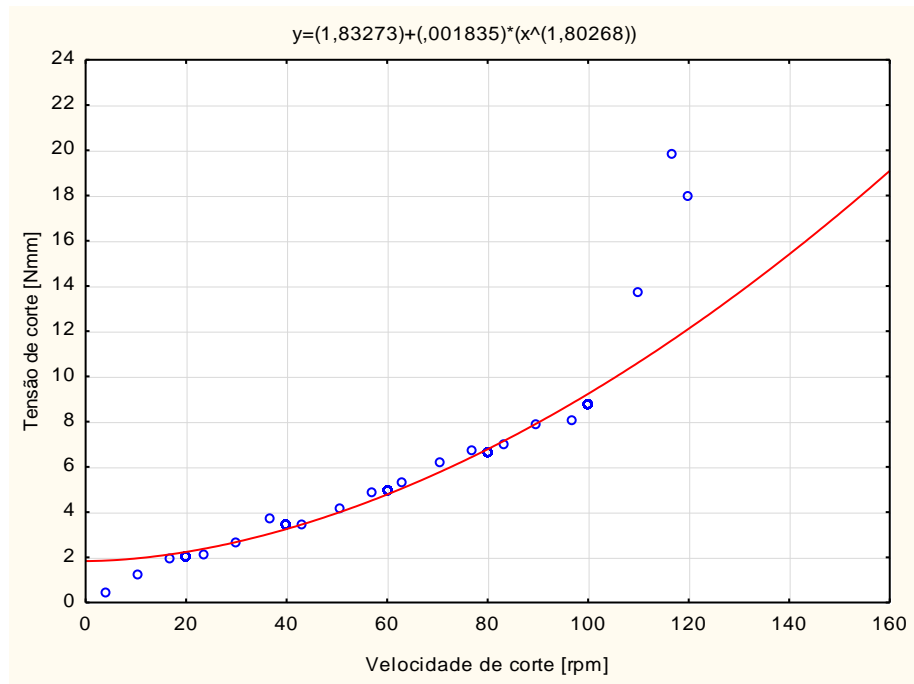


Figura B.4.3 - Curva de escoamento da argamassa Amostra3.FCCV.0,80.WSpRef.

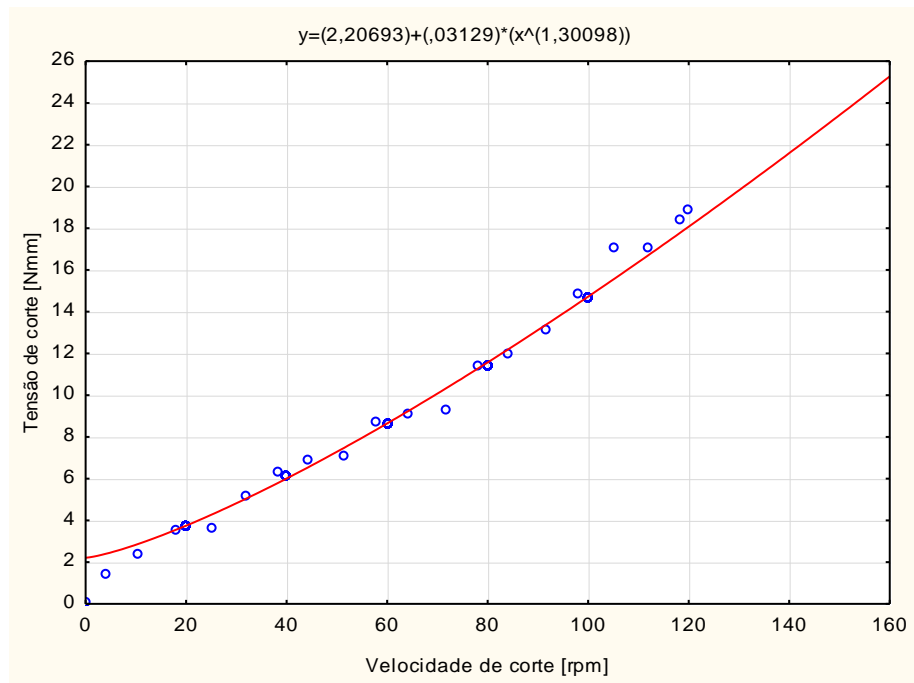


Figura B.4.4 - Curva de escoamento da argamassa Amostra4.FCCV.0,80.WSpRef.

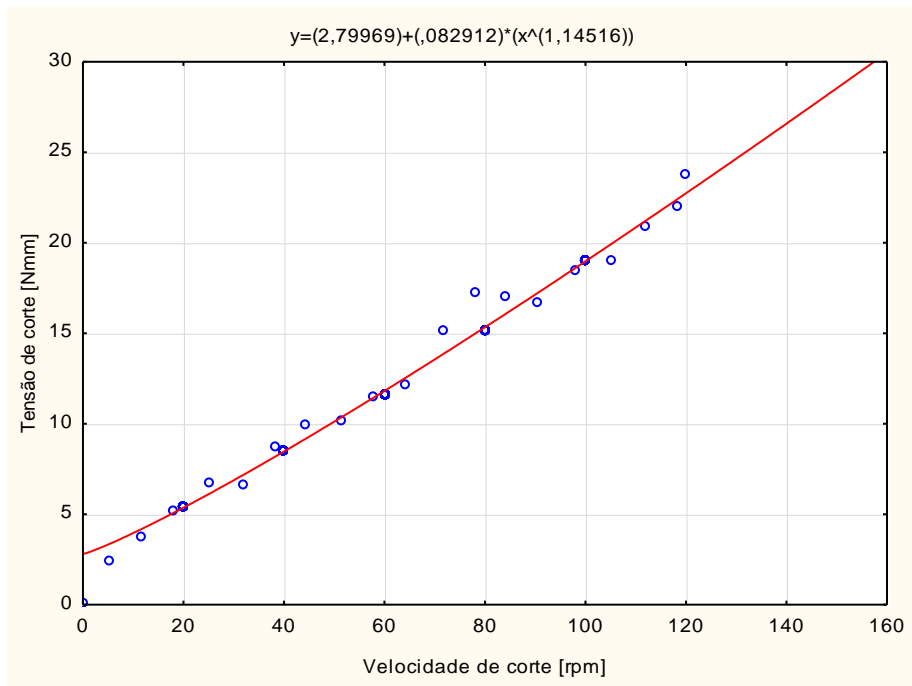


Figura B.4.5 - Curva de escoamento da argamassa Amostra5.FCCV.0,80.WSpRef.

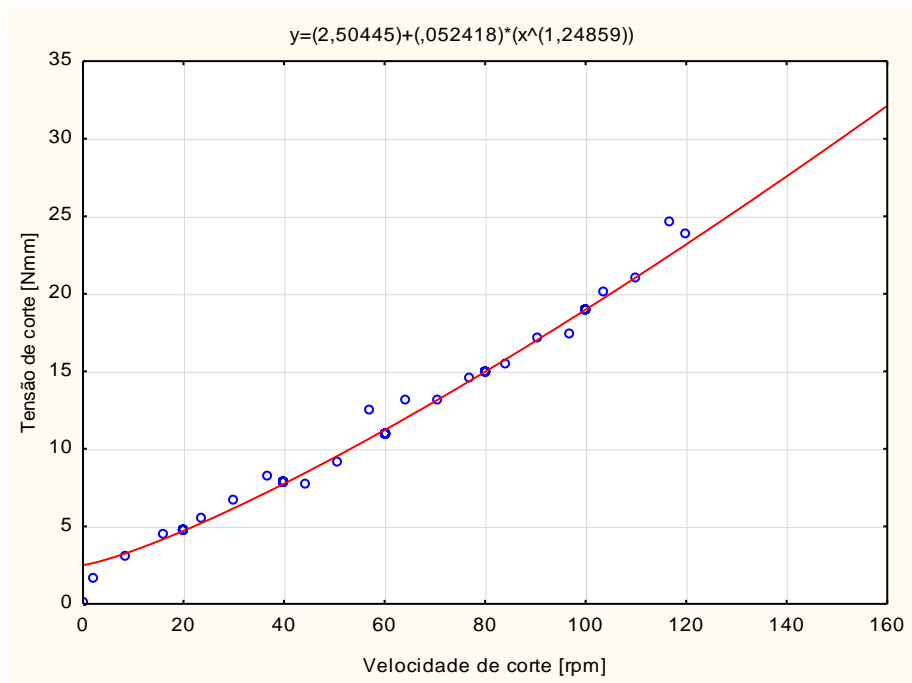


Figura B.4.6 - Curva de escoamento da argamassa Amostra6.FCCV.0,80.WSpRef.

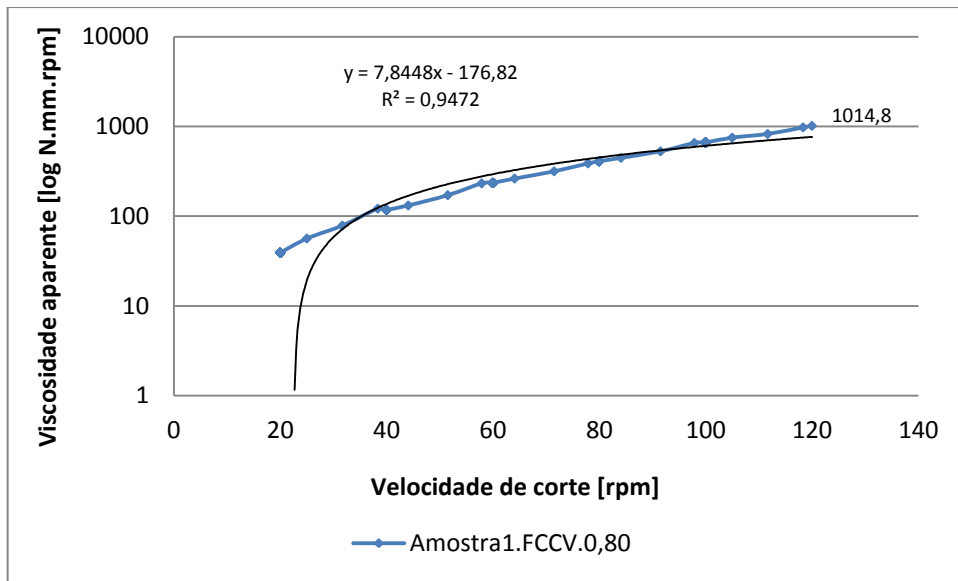


Figura B.4.7 - Curva de viscosidade da argamassa Amostra1.FCCV.0,80 de referência.

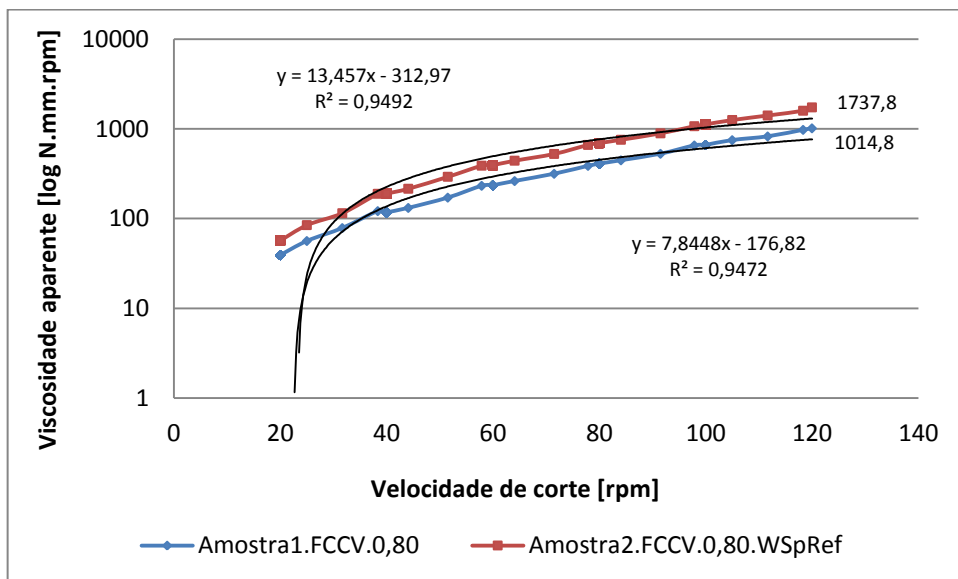


Figura B.4.8 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra2.FCCV.0,80.WSpRef e de referência.

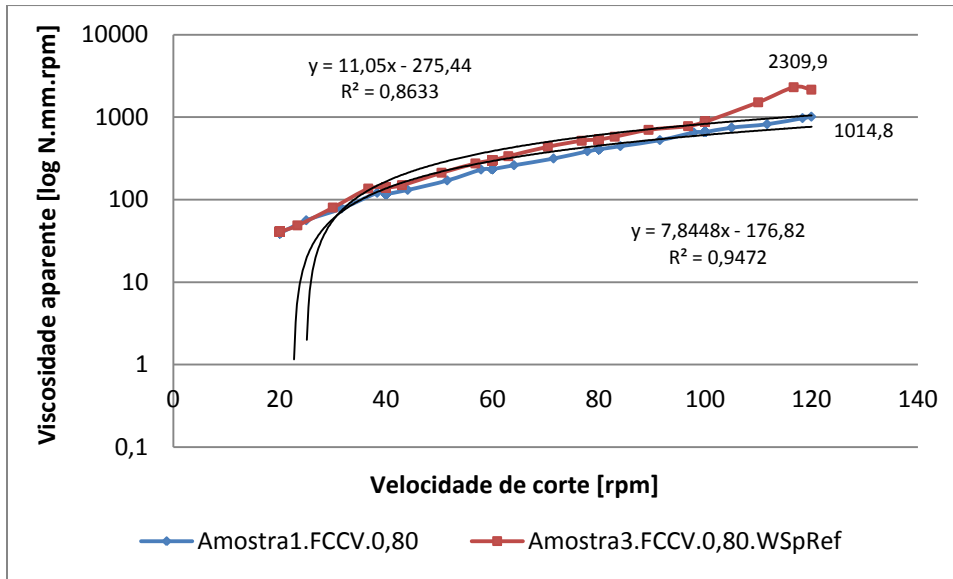


Figura B.4.9 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra3.FCCV.0,80.WSpRef e de referência.

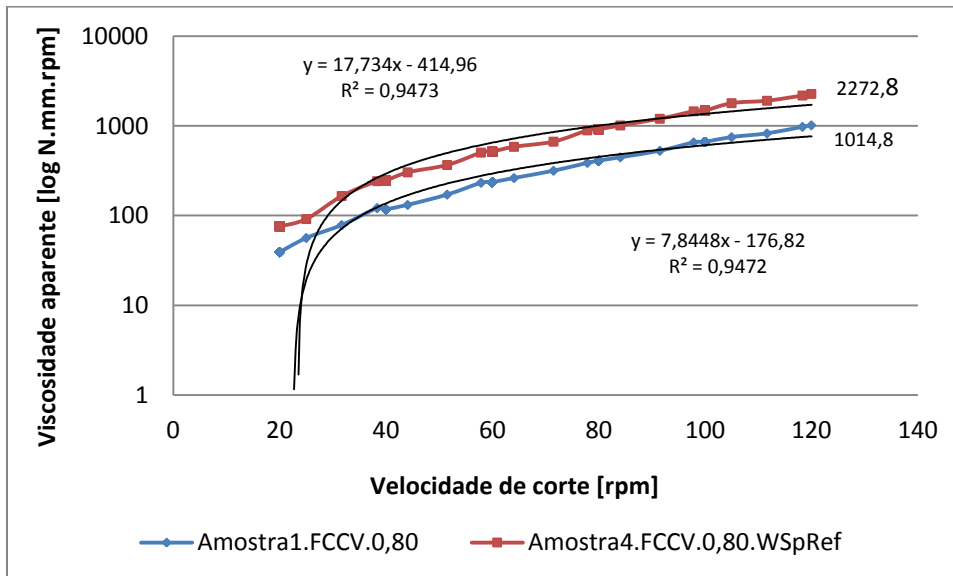


Figura B.4.10 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra4.FCCV.0,80.WSpRef e de referência.

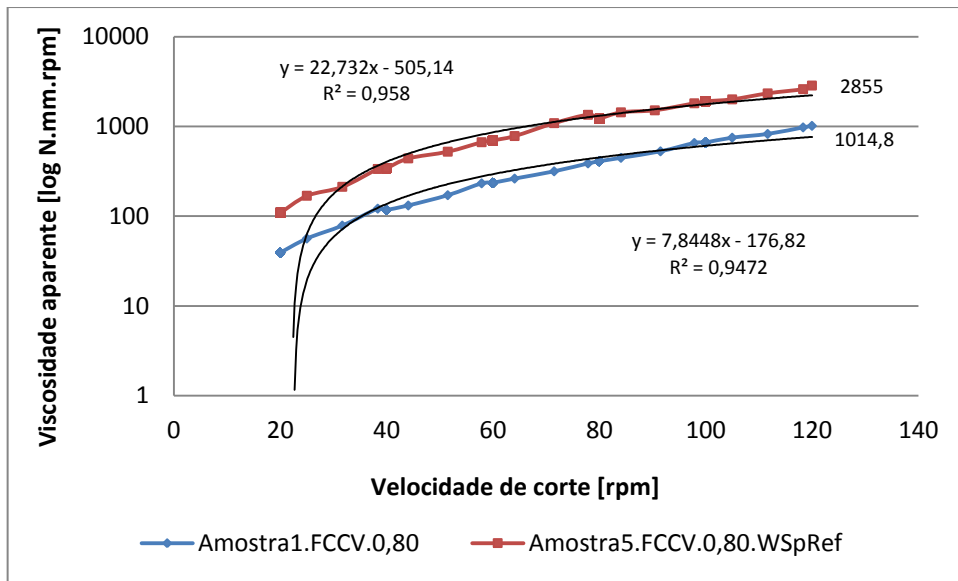


Figura B.4.11 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra5.FCCV.0,80.WSpRef e de referência.

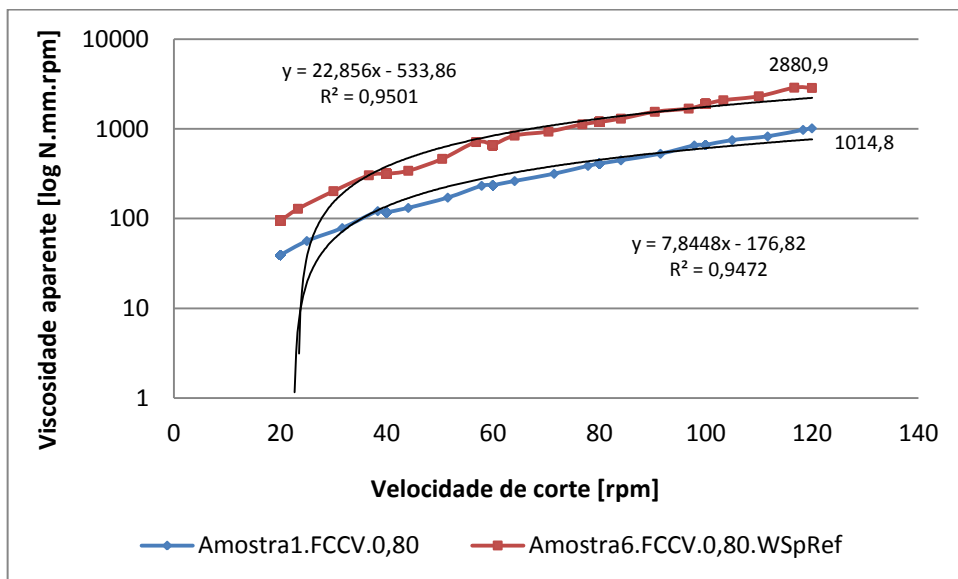


Figura B.4.12 - Curvas de viscosidade da argamassa Amostra6.FCCV.0,80.WSpRef e de referência.

Anexo C

ESTUDO REOLÓGICO ADICIONAL DAS ARGAMASSAS

Anexo C.1

TIXOTROPIA DAS ARGAMASSAS - SÉRIE 1 CORRIGIDA

Tabela C.1.1 - Quantificação da tixotropia das argamassas corrigidas da Série 1.

Série 1 Corrigida				
Designação da argamassa	Medição das áreas de tixotropia [N.mm.rpm]			Classificação do material
	Tixotrópicas	Reopéticas	Diferencial	
Amostra1.FC.0,80	115,84	5,67	110,17	Tixotrópico
Amostra2.FC.0,80	131,27	18,15	113,11	Tixotrópico
Amostra3.FC.0,80	319,75	228,23	91,53	Tixotrópico
Amostra4.FC.0,80	261,56	247,39	14,17	Tixotrópico
Amostra5.FC.0,80	92,39	224,79	-132,41	Reopético
Amostra6.FC.0,80	362,90	3081,95	-2719,05	Reopético

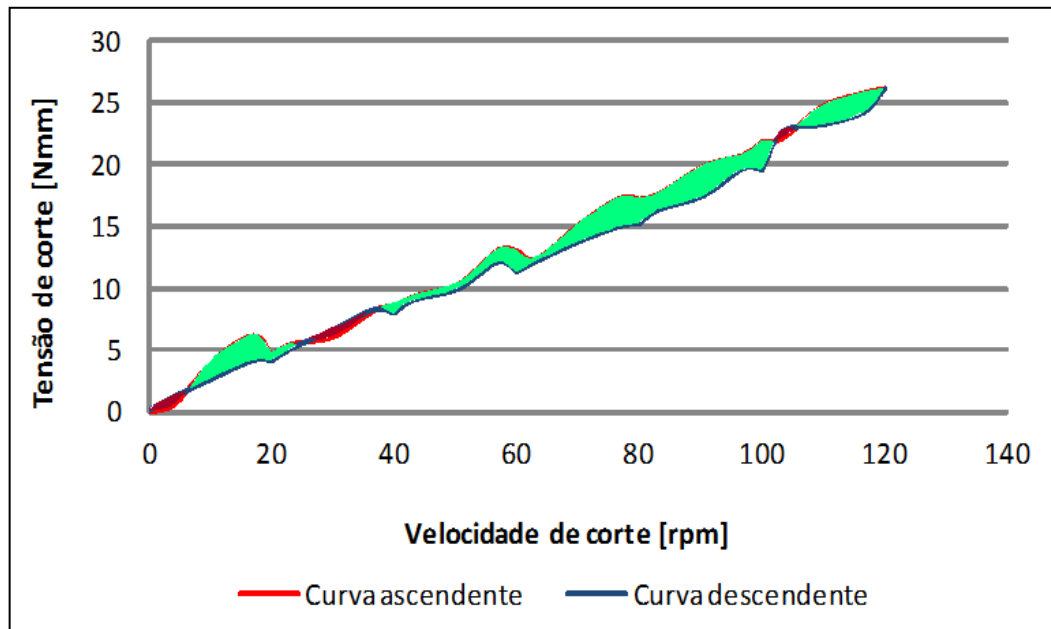


Figura C.1.1 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra1.FC.0,80.

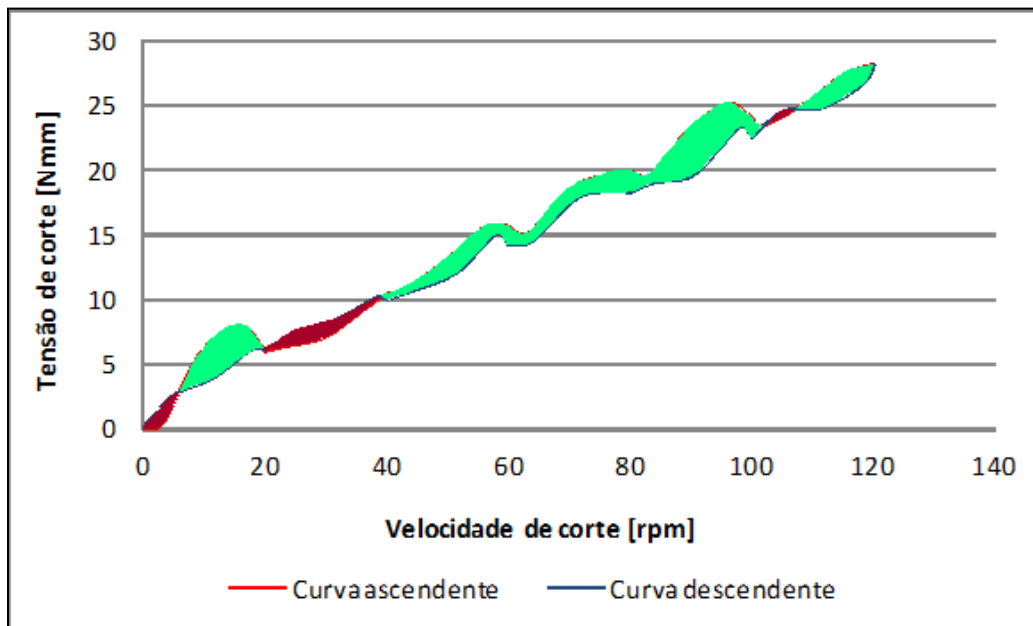


Figura C.1.2 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra2.FC.0,80.

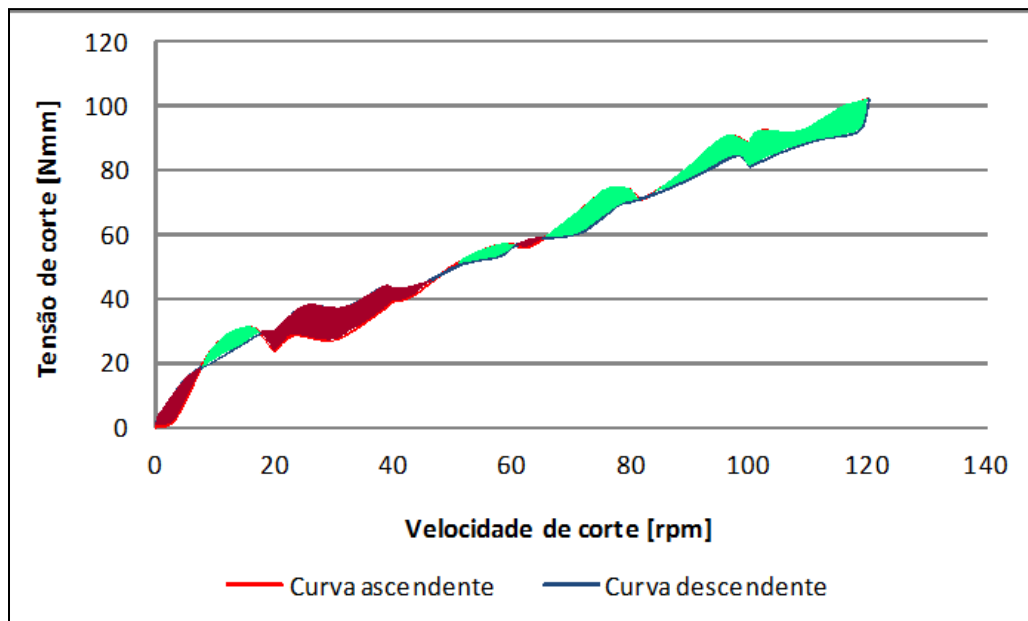


Figura C.1.3 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra3.FC.0,80.

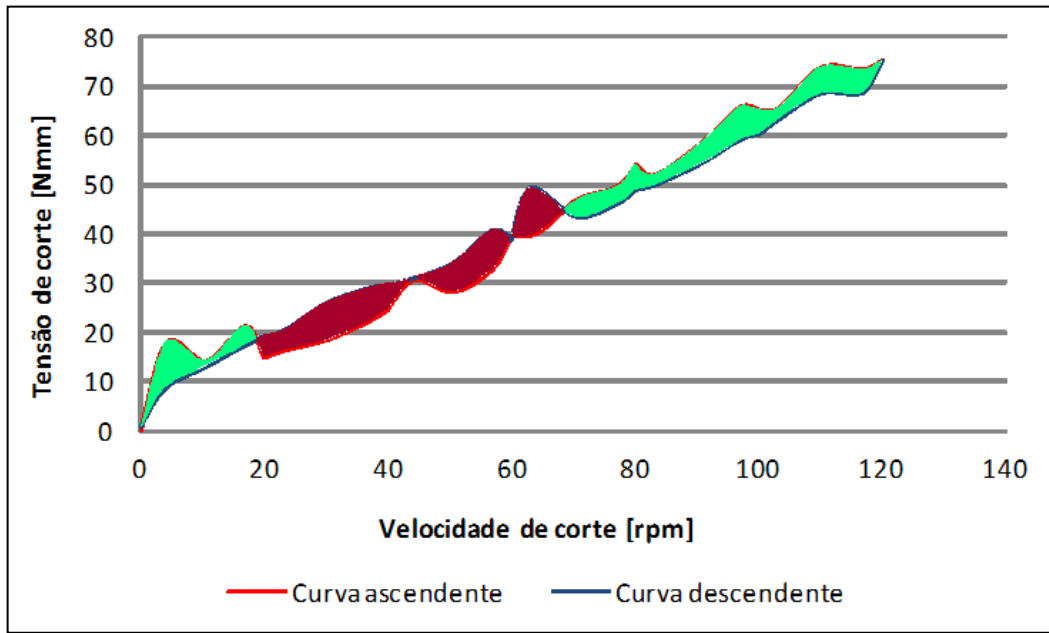


Figura C.1.4 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra4.FC.0,80.

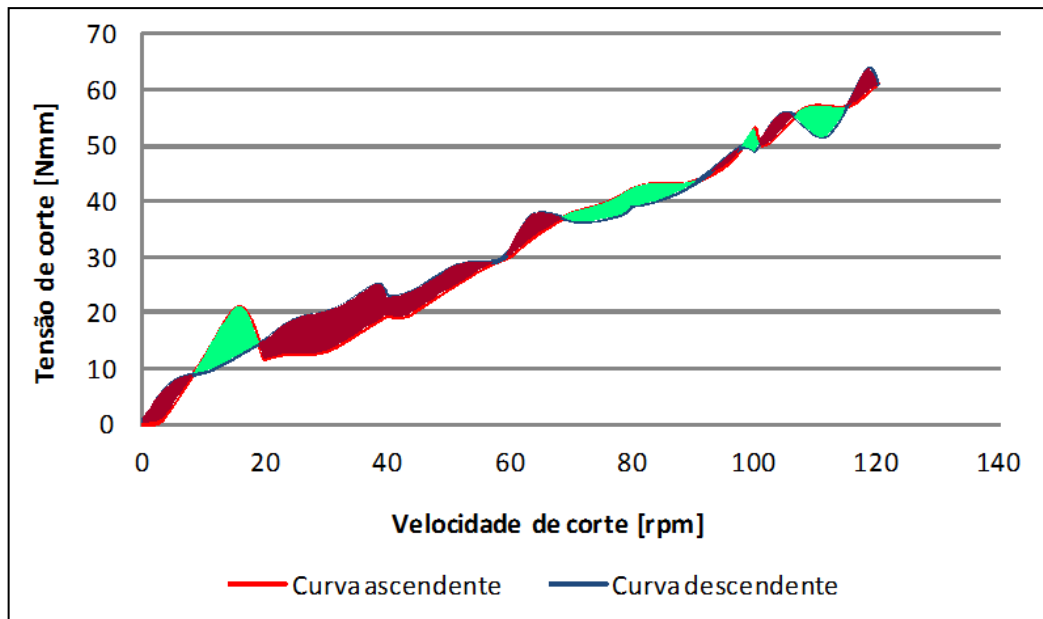


Figura C.1.5 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra5.FC.0,80.

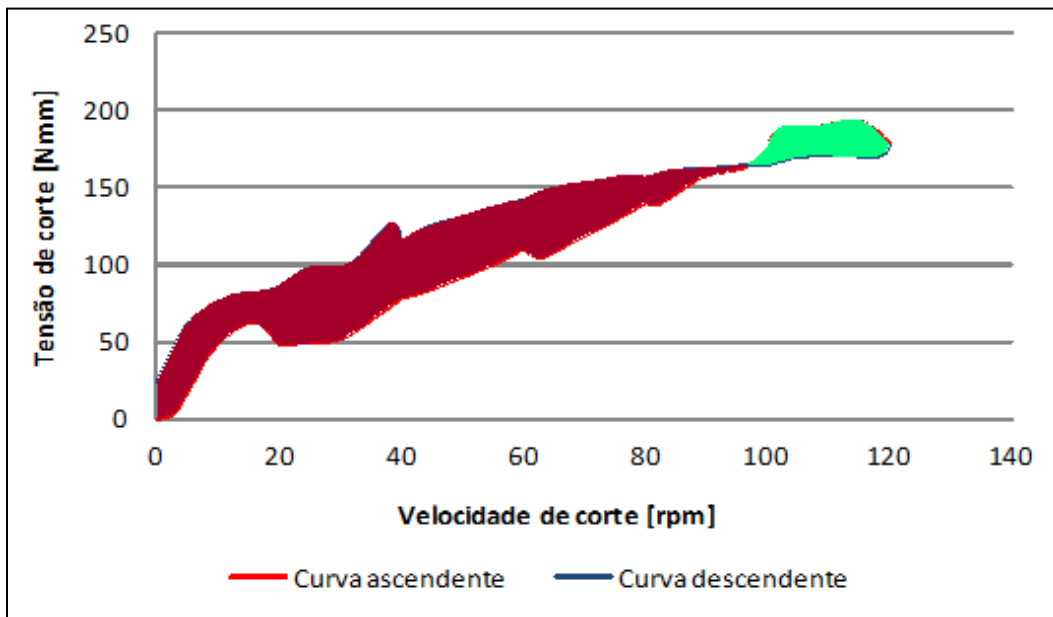


Figura C.1.6 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra6.FC.0,80.

Anexo C.2

TIXOTROPIA DAS ARGAMASSAS - SÉRIE 2 CORRIGIDA

Tabela C.2.1 - Quantificação da tixotropia das argamassas corrigidas da Série 2.

Série 2 Corrigida				
Designação da argamassa	Medição das áreas de tixotropia [N.mm.rpm]			Classificação do material
	Tixotrópicas	Reopéticas	Diferencial	
Amostra1.FCCV.0,80	79,44	2,74	76,71	Tixotrópico
Amostra2.FCCV.0,80	161,26	0,03	161,23	Tixotrópico
Amostra3.FCCV.0,80	101,31	7,15	94,15	Tixotrópico
Amostra4.FCCV.0,80	179,87	14,90	164,97	Tixotrópico
Amostra5.FCCV.0,80	230,20	30,26	199,94	Tixotrópico
Amostra6.FCCV.0,80	376,82	135,67	241,15	Tixotrópico

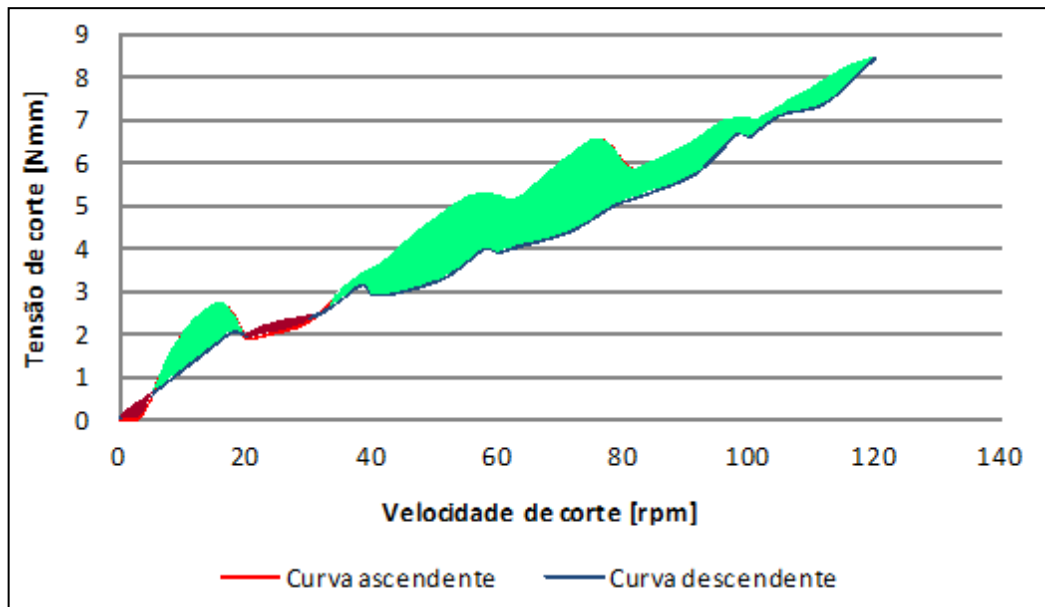


Figura C.2.1 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra1.FCCV.0,80.

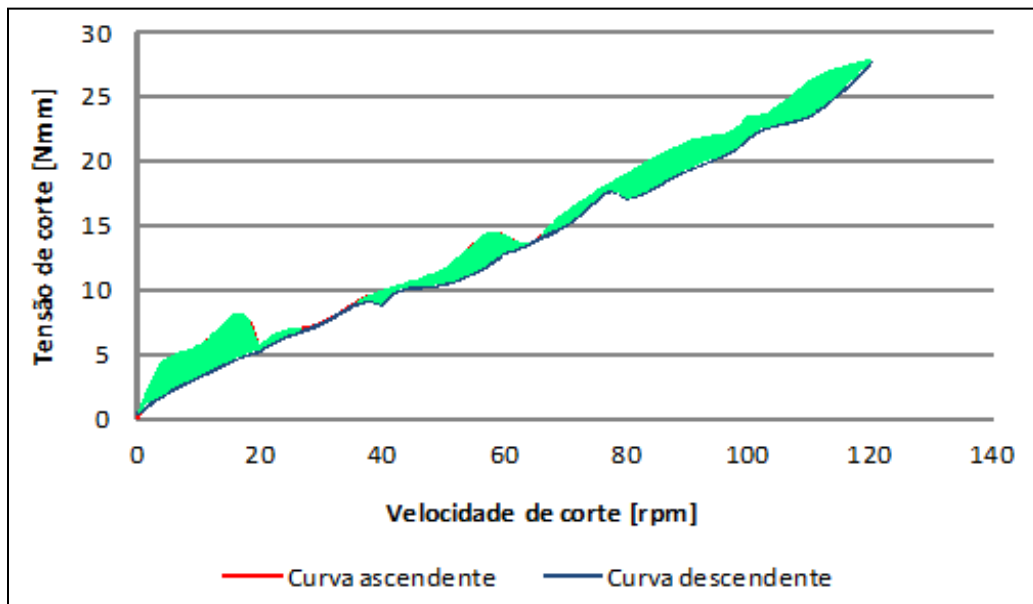


Figura C.2.2 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra2.FCCV.0,80.

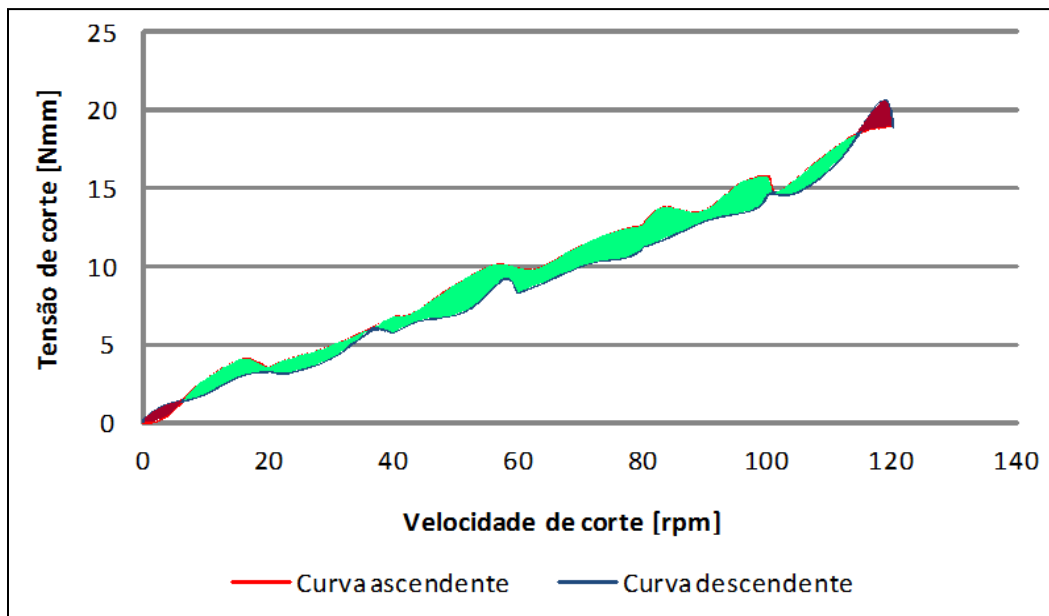


Figura C.2.3 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra3.FCCV.0,80.

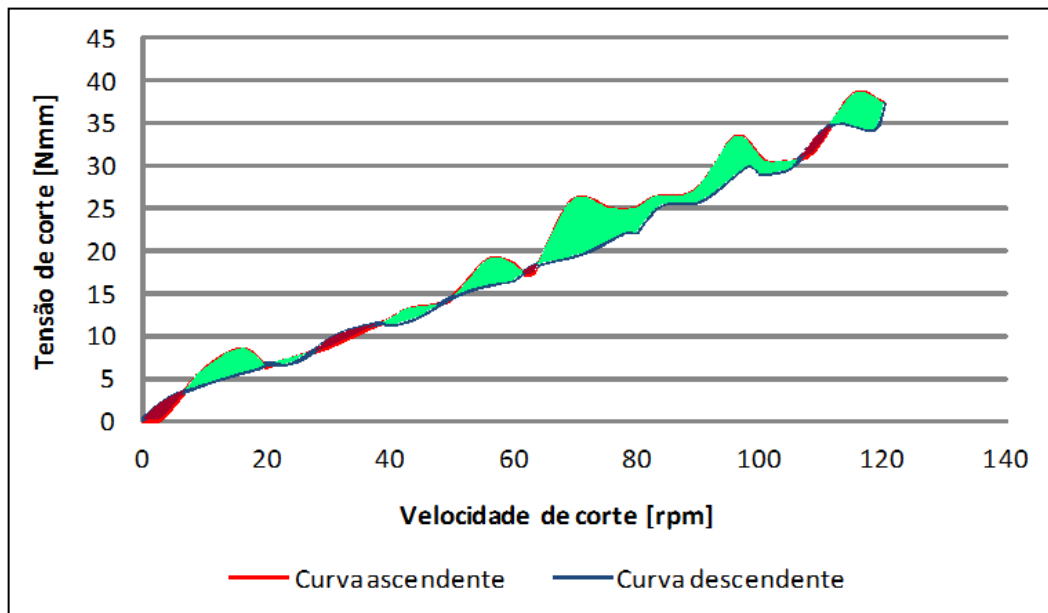


Figura C.2.4 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra4.FCCV.0,80.

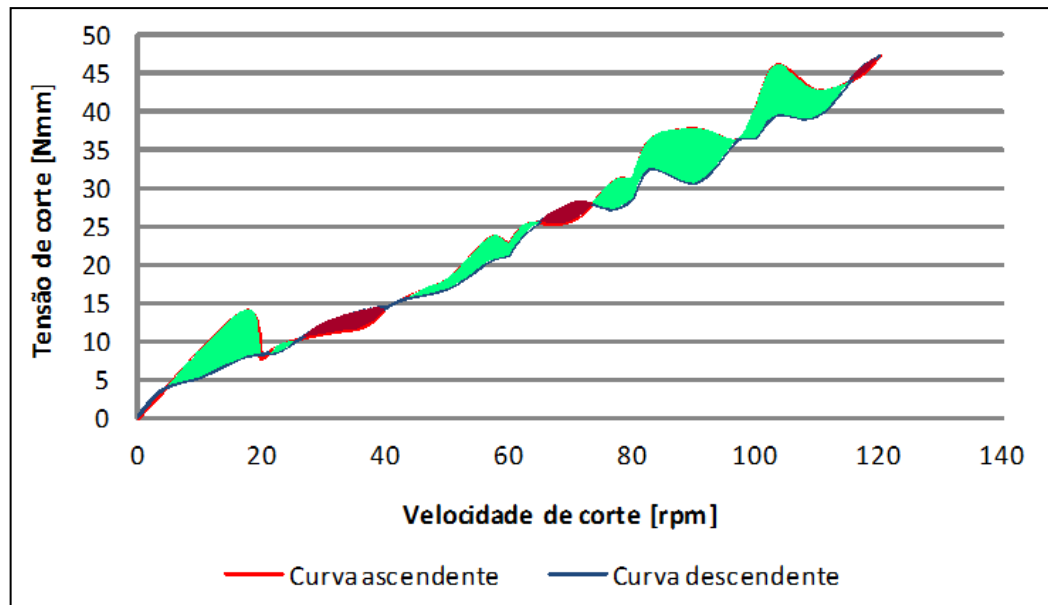


Figura C.2.5 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra5.FCCV.0,80.

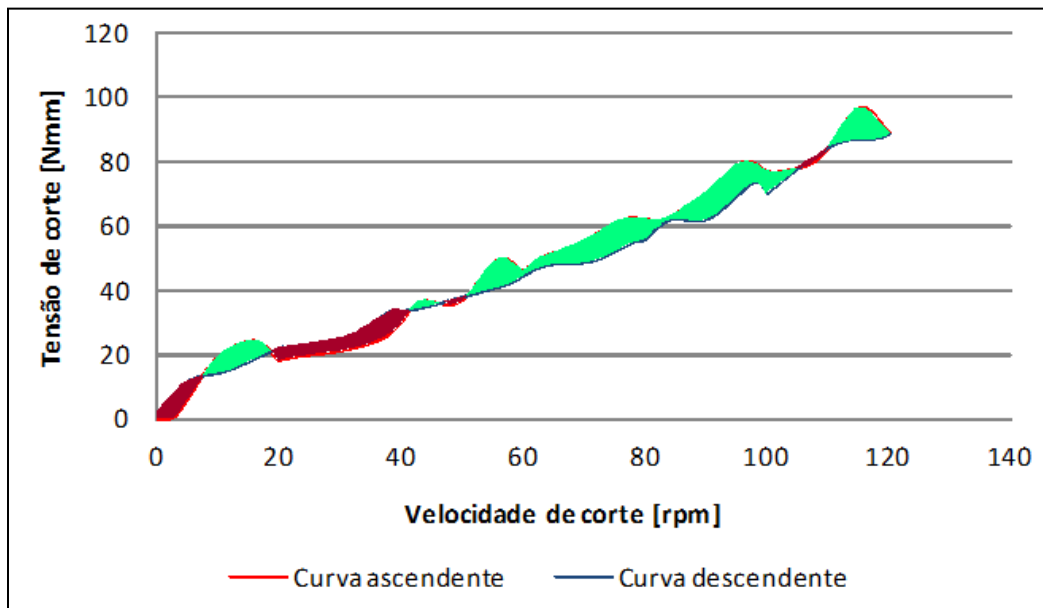


Figura C.2.6 - Áreas de tixotropia da argamassa Amostra6.FCCV.0,80.

