



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Caldas sustentáveis para consolidação e durabilidade de construções históricas

Rúben de Oliveira Timóteo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira

Covilhã, Outubro de 2012

Agradecimentos

Expresso o meu agradecimento às pessoas e/ou entidades, que das mais diversificadas formas contribuíram para que a realização deste trabalho fosse possível.

Em particular desejo agradecer:

Ao Professor Luís Oliveira, sob cuja orientação decorreu a realização deste trabalho, pelos seus ensinamentos, empenho, sugestões e disponibilidade.

Agradeço à Universidade da Beira Interior a minha formação académica e disponibilização dos meios necessários à realização deste estudo.

Aos meus amigos e família, que me apoiaram incondicionalmente nos bons e maus momentos.

Um especial agradecimento aos meus pais, pela educação que me deram e também pelo esforço que fizeram para que pudesse alcançar esta etapa da minha vida.

Resumo

Esta dissertação, essencialmente de cariz experimental, aborda indiretamente o tema da reabilitação de edificações históricas, através do estudo de caldas de cimento comumente utilizadas na técnica de consolidação de paredes por injeção.

Nesta investigação compara-se o desempenho de caldas económicas com fluidez semelhante. Para o efeito é substituído metade do cimento por adições sustentáveis/recicladas (pó de vidro, pó cerâmico, metacaulino, fíler calcário e biomassa).

O comportamento reológico das caldas no estado fresco foi avaliado através dos ensaios de espalhamento (mini slump) e através do reómetro Viskomat NT para determinação dos parâmetros tensão de cedência e viscosidade plástica relativa. Ainda neste estado foram efetuados ensaios de injetabilidade num meio poroso. Para a avaliação do comportamento mecânico foram realizados ensaios no estado endurecido relativos à resistência à flexão e à compressão, ao módulo de elasticidade dinâmico, à retração livre e à absorção de água por capilaridade.

Dos ensaios realizados, verificou-se que as caldas com metacaulino ou pó de vidro são as menos viscosas, mas a que apresentou maior facilidade de penetração foi a calda com pó cerâmico. Nos ensaios também foram identificadas características pozolânicas nas caldas com pó de vidro, pó cerâmico ou metacaulino por terem apresentado aumentos de resistência após os 28 dias de cura. No entanto, nesta atividade laboratorial foram verificados alguns problemas, tais como, a segregação estar acima dos níveis aconselhados pela literatura quando as misturas são deixadas em repouso num meio impermeável, o que merece maior aprofundamento pois ambiciona-se que estas sejam injetadas em meios porosos.

Palavras-chave

Calda, fluidez, injetabilidade, viscosidade, segregação.

Abstract

This dissertation, of essentially experimental nature, indirectly tackles the rehabilitation of historic buildings, through the study of grouts commonly used in wall consolidation by injection.

The performance of economic grouts with similar fluidity is compared. For this effect half the cement was replaced by sustainable/ recycled additions (glass powder, clay, metakaolin, limestone filler and biomass).

The rheological behavior of the cement pastes while fresh was evaluated by mini-slump essays and by rheometer (viskomat NT) for determination of tension parameters of shear stress and consistency. Essays of injectability into porous structures were also performed to the fresh grouts. To evaluate mechanic behavior, essays were performed to the hardened state studying resistance to flexion and compression, Young modulus, grouting retraction and capillary water absorption.

The essays performed showed that the cement pastes with metakaolin and glass powder are the least viscous, but the clay grout presented the best penetration into porous structure. The essays identified pozzolanic properties in the grouts with glass powder, clay and metakaoline which showed increased resistance after the 28 day curing period. There were however some problems with segregation being above the levels advised by literature when mixes are left to rest in an impermeable media. This deserves further investigation as injectability into porous structures is ambicionado

Keywords

Grout; fluidity; injectability; viscosity; segregation

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Objetivos do tema proposto	2
1.3	Organização da dissertação	2
2	Reabilitação de edifícios antigos de alvenaria de pedra	3
2.1	Construções antigas em alvenaria de pedra	3
2.1.1	Principais anomalias	5
2.1.2	Principais técnicas de intervenção estrutural	6
3	Calda económica / sustentável	13
3.1	Materiais constituintes das caldas	13
3.1.1	Cimento Portland	13
3.1.2	Superplastificante	15
3.1.3	Adições	17
3.1.4	Água	24
3.2	Comportamento reológico de caldas cimentícias	24
3.3	Conclusão	31
4	Descrição do Programa Experimental	33
4.1	Seleção e caracterização dos materiais utilizados	33
4.1.1	Generalidades	33
4.1.2	Ligante	33
4.1.3	Adições	34
4.1.4	Adjuvante	39
4.1.5	Água de amassadura	40
4.2	Preparação das caldas	40
4.2.1	Equipamento	40
4.2.2	Protocolo de amassadura com um misturador mecânico.	41
4.2.3	Moldagem de corpos de prova	42
4.3	Ensaio realizados	42
4.3.1	Ensaio às caldas no estado fresco	43
4.3.2	Ensaio no estado endurecido	50
5	Apresentação e discussão de resultados	57
5.1	Propriedades das caldas no estado fresco	57
5.1.1	Condições iniciais para realização da atividade experimental	57
5.1.2	Exsudação e segregação	61

5.1.3	Massa Volúmica	64
5.1.4	Modelo e parâmetros reológicos das caldas de injeção	65
5.1.5	Injetabilidade	72
5.2	Propriedades das caldas no estado endurecido	74
5.2.1	Resistência.....	74
5.2.2	Módulo de elasticidade dinâmico.....	79
5.2.3	Retração	81
5.2.4	Capilaridade.....	83
6	Conclusão.....	87
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	89
ANEXO A		99
ANEXO B		105

Lista de Figuras

Figura 2.1 Procedimento para avaliação da adequabilidade da injeção [5].....	9
Figura 3.1 - Ação de um superplastificante normal [14].....	15
Figura 3.2 - Perda de trabalhabilidade de um superplastificante normal	16
Figura 3.3 - Molécula de um Policarboxilato.....	16
Figura 3.4 - Ação do policarboxilato sobre as partículas de cimento	16
Figura 3.5 - Manutenção da trabalhabilidade devido ao efeito estérico.....	17
Figura 3.6 - Efeito da substituição de uma pozolana natural sobre o calor de hidratação [21]	19
Figura 3.7 - Modelo ilustrativo do consumo de álcalis na reação pozolânica durante as primeiras 4 semanas [38].....	23
Figura 3.8 - Curvas de fluxo da Lei das Potências [47].....	26
Figura 3.9 - Curvas de fluxo dos fluidos Newtoniano e de Bingham [47]	26
Figura 3.10 - Curvas de fluxo de diferentes fluidos [63].....	27
Figura 3.11 - Curva histerese de um betão de alta resistência [47].	29
Figura 3.12 - Curvas de fluxo para fluidos reopéxicos e tixotrópicos [47].....	29
Figura 4.1 - Cimento Portland (CEM II/B-L classe 32,5N)	34
Figura 4.2 - Fíler calcário	35
Figura 4.3 - Preparação do pó de vidro, (a) vidro moído; (b) vidro moído < 45 µm; (c) moinho de bolas cerâmicas em funcionamento; (d) vidro a ser peneirado.	37
Figura 4.4 - a) Telhas utilizadas no estudo; b) britador de mandíbulas; (c) Material cerâmico saído do britador de mandíbulas; (d) Pó cerâmico < 75 µm.....	38
Figura 4.5 - Metacaulino.....	39
Figura 4.6 - Biomassa	39
Figura 4.7 - Superplastificante Sika® ViscoCrete® 3005.....	40
Figura 4.8 - Misturador e pá, respetivamente	40
Figura 4.9 - Balança digital com precisão de 0,1 g	41
Figura 4.10 - Exemplo de um corpo de prova.....	42
Figura 4.11 - Molde a ser lubrificado antes da introdução da calda	42
Figura 4.12 - Ensaio fluidez pelo cone de Marsh	43
Figura 4.13 - Ensaio de espalhamento (mini slump)	44
Figura 4.14 - Ensaio de exsudação	45
Figura 4.15 - Pesagem de 1 litro de calda	45
Figura 4.16 - Esquema do ensaio de injetabilidade na coluna de areia [56]	46
Figura 4.17 - Reómetro Viskomat nt.....	49
Figura 4.18 - Perfil velocidade em rampa [58]	49
Figura 4.19 - Perfil de velocidade em patamar [58].....	50
Figura 4.20 - Ensaio à flexão, (a) Máquina de ensaio; (b) corpo de prova a ser ensaiado, (c) corpo de prova já ensaiado	51

Figura 4.21 - Ensaio à compressão.....	51
Figura 4.22 - Pesagem dos corpos de prova, (a) não imerso e (b) imerso	52
Figura 4.23 - a) Calibração da velocidade de propagação da onda num elemento com propriedades conhecidas; b) Propagação do sinal num provete	53
Figura 4.24 - Ensaio de capilaridade	54
Figura 4.25 - a) Calibragem do micrómetro digital; b) medição do provete	55
Figura 4.26 - (a) Corpo de prova descofrado; (b) corpo de prova partido quando se desenroscava a chapa metálica	56
Figura 5.1 - Fluidez das caldas pelo ensaio do cone de Marsh 18 ± 2 s	57
Figura 5.2 - Consistência por espalhamento pelo ensaio mini-slump	58
Figura 5.3 - Correlação entre o espalhamento e o tempo de escoamento, (a) sem calda C e (b) inclui a calda C.....	59
Figura d.4 - Relações a/b necessárias para fluidez desejada.....	60
Figura 5.5 - % de exsudação após 3h da amassadura	61
Figura 5.6 - % de segregação das caldas com adições após 3h de amassadura	62
Figura 5.7 - % de segregação ao longo de 3h	62
Figura 5.8 - Concentração de cimento na face inferior dos corpos de prova	63
Figura 5.9 - Efeito da segregação no estado endurecido	64
Figura 5.10 - Massa volúmica	64
Figura 5.11 - Exemplo de resultado da equação Herschel-Bulkley.....	65
Figura 5.12 - Variação da tensão de cedência no decorrer do ensaio.....	66
Figura d.13 - Variação do índice de viscosidade plástica relativa no decorrer do ensaio	67
Figura 5.14 - Dilatância ao longo do tempo.....	68
Figura 5.15 - Tensão de cedência de cada calda.....	69
Figura 5.16 - Viscosidade plástica relativa de cada calda.....	70
Figura 5.17 - Dilatância.....	71
Figura 5.18 - Gráficos para verificação da existência de tixotropia. (a) calda C, (b) calda CB, (c) calda CFC, (d) calda CV, (e) calda CM, (f) calda CT	72
Figura 5.19 - Penetrabilidade das caldas.....	73
Figura 5.20 - Caudal instalado (ml / s)	73
Figura 5.21 - Resistência à flexão aos 28 dias	74
Figura 5.22 - Resistência à flexão aos 42 dias	74
Figura 5.23 - Resistência à compressão aos 28 dias	75
Figura 5.24 - Resistência à compressão aos 42 dias	76
Figura 5.25 - Relação entre resistência à tração e compressão aos 28 dias	77
Figura 5.26 - Relação entre resistência à tração e compressão aos 42 dias	77
Figura 5.27 - Influência da razão água/materiais sólidos na resistência à compressão aos 28 dias.....	78
Figura 5.28 - Influência da razão água/materiais sólidos na resistência à compressão aos 42 dias.....	78

Figura 5.29 - Relação entre a resistência à compressão e a razão água/cimento aos 28 dias .	79
Figura 5.30 - Relação entre a resistência à compressão e a razão água/cimento aos 42 dias .	79
Figura 5.31 - Módulo de elasticidade dinâmico.....	80
Figura 5.32 - Relação entre módulo de Young e resistência à compressão, (a) inclui calda C e (b) apenas caldas com adições	80
Figura 5.33 - Variação da retração ao longo de 28 dias.....	81
Figura 5.34 - Retração aos 28 dias.....	82
Figura 5.35 - Evolução da retração com a perda de massa.....	82
Figura 5.36 - Coeficiente de capilaridade	84
Figura 5.37 - a) Ensaio de capilaridade, (a) com calda CFC e (b) calda sem adições	84

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Resumo dos resultados dos ensaios compressão uniaxial das paredes não reforçadas [2].	7
Tabela 2.2 Resultados dos ensaios realizados nas paredes reforçadas com injeção [2].	8
Tabela 3.1 - Expressões que caracterizam o comportamento reológico de fluídos e suspensões [1].	28
Tabela 4.1 - Composição química do metacaulino [21]	38

Lista de Acrónimos

CEN	Comité Europeu de Normalização
GRP	Gabinete de Relações Públicas
ICOMOS	Comité científico internacional para análise e restauro de estruturas do património arquitetónico
NP	Norma portuguesa
UBI	Universidade da Beira Interior

Simbologia

S.E	Superfície específica
CaO	Cal
SiO ₂	Sílica
Al ₂ O ₃	Alumina
FeO	Óxido de ferro
CaO ₃	Calcário
CaSO ₄	Gesso
C ₃ S	Silicato de tricálcico (alite)
C ₂ S	Silicato de bicálcio
C ₃ A	Aluminato
C ₄ AF	Ferroaluminato de Cálcio
C ₆ AS ₃ H ₃₂	Estringita
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C-A-H	Aluminato de cálcio hidratado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
a/c	Razão água cimento
a/b	Razão água e constituintes sólidos das caldas
H ₂ O	Água
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
CH _{cimento Portland}	Hidróxido de cálcio do cimento Portland
τ	Tensão de corte, em MPa
F	Força, em N
A	Área, em m ²
η	Coeficiente de viscosidade
γ	Taxa de deformação
n	Índice lei das potências
τ _y	Tensão de cedência
P	Densidade
v	Velocidade
C	Calda de cimento
CFC	Calda de cimento com adição de fíler calcário
CV	Calda de cimento com adição de pó de vidro
CT	Calda de cimento com adição de pó cerâmico
CM	Calda de cimento com adição de metacaulino
CB	Calda de cimento com adição de biomassa

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

"Uma nação, em qualquer período, é três coisas: a primeira é uma relação com o passado; a segunda uma relação com o presente, nacional e estrangeiro; a terceira, uma direcção para o futuro"

Fernando Pessoa

É esta a premissa que me motiva na elaboração deste trabalho laboratorial que propõe alternativas ao uso de material de consolidação de paredes para a reabilitação de edifícios históricos. Com este tipo de intervenção ambiciona-se manter a identidade do património histórico e também utilizar os recursos mínimos para que este ato seja o mais económico e sustentável possível, contribuindo assim, para um futuro “mais limpo” onde a história e cultura de várias gerações serão conservadas.

Quando pensamos em reforçar um edifício antigo, devemos ter em consideração a compatibilidade do reforço com a edificação a nível mecânico-estrutural, físico-químico, durabilidade e se possível, o reforço deve de ser reversível.

Nos edifícios, em que as paredes são de alvenaria de pedra constituídas por três panos, geralmente são verificadas anomalias no pano intermédio por este ser executado com cuidados diferentes e com materiais de baixas resistências. Este método construtivo pode comprometer o comportamento eficiente das paredes.

Atualmente, para este tipo de anomalia, é frequente utilizarem-se técnicas de reforço passivas através da injeção de caldas para efeitos de consolidação. Estas preenchem os espaços vazios do pano interno e eventuais fendas existentes na alvenaria. Esta técnica, apesar de irreversível, é das mais utilizadas e menos agressivas em questões de compatibilidade de materiais e também é consideravelmente durável. Para se efetuar a injeção é necessário que a calda possua propriedades reológicas, químicas, físicas, mecânicas e térmicas adequadas para o efeito. [1, 2]

Relativamente aos materiais utilizados na produção de caldas de consolidação, o cimento Portland é normalmente o constituinte principal. Por esta razão, neste estudo desenvolve-se caldas, nas quais o cimento Portland é parcialmente substituído (50%) por adições

sustentáveis/recicladas, para que além do objetivo mencionado, se possa melhorar ainda o desempenho das misturas.

Estas são genericamente constituídas por ligante (cimento), água, adjuvante (superplastificante) e adições. No presente trabalho laboratorial são estudadas misturas com adições do tipo I (quase inertes), é exemplo o fíler calcário, e adições do tipo II (pozolânicas ou potencialmente hidráulicas), como o metacaulino, o pó cerâmico e o pó de vidro.

1.2 Objetivos do tema proposto

O presente estudo teve por objetivo analisar experimentalmente o comportamento de caldas de injeção ao substituir-se parcialmente o cimento Portland (50%) por adições sustentáveis, e verificar a sua viabilidade para fins de consolidação de paredes em alvenaria, por exemplo de pedra de 3 panos.

1.3 Organização da dissertação

O presente estudo encontra-se estruturado em 6 capítulos, incluindo esta introdução, os quais se organizam do seguinte modo:

O Capítulo 2 apresenta um levantamento do estado da arte, onde se referem construções antigas em alvenaria de pedra; principais anomalias; principais técnicas de intervenção estrutural; técnica de injeção de calda; propriedades de caldas para injeção.

No Capítulo 3 descrevem-se os constituintes para uma calda de consolidação, que se deseja considerar como sustentável, incluindo as suas vantagens e desvantagens.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia adotada na fase experimental do presente estudo, neste são apresentados os materiais utilizados na constituição das caldas e também são descritos os métodos experimentais e respetivos procedimentos.

No Capítulo 5 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos durante a campanha experimental.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões do estudo realizado e algumas propostas para trabalhos futuros.

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

Capítulo 2

2 Reabilitação de edifícios antigos de alvenaria de pedra

Com o presente capítulo, pretende-se potenciar as intervenções de reabilitação em edifícios históricos de alvenaria de pedra. Neste são apresentadas metodologias adequadas para que se verifique a viabilidade do ato de reabilitação, referindo-se ainda, que todas as intervenções devem ter em consideração o princípio da intervenção mínima, para que se danifique o menos possível a identidade das edificações.

Neste capítulo, também são apresentadas as anomalias comumente verificadas, bem como as respetivas técnicas de intervenção estrutural. Sendo a técnica mais aprofundada a de consolidação por injeção de caldas de cimento, visto que na presente investigação se ambiciona a produção destas mas de maneira mais económica para efeitos de consolidação de paredes em alvenaria de pedra entre outras.

Para se proceder a injeção de uma calda numa parede em alvenaria de pedra é importante que exista boa compatibilização entre esta e o suporte onde será aplicada, para que se evitem novas deteriorações, estas relacionadas com o comportamento mecânico ou químico com o material existente. No final do capítulo serão mencionadas as propriedades desejadas de uma calda para os fins referidos.

2.1 Construções antigas em alvenaria de pedra

Por toda a Europa é frequente encontrarem-se construções antigas em alvenaria, principalmente em centros urbanos históricos de cidades. Estas edificações conservam a história e a cultura de várias gerações, funcionando como um testemunho de ideias, dos princípios, das religiões, da arte, da arquitetura e da situação económica em geral da época em que foram construídos [2].

Grande parte destes edifícios foi deixada ao abandono durante vários anos, e muitos deles com o decorrer do tempo foram-se degradando acabando mesmo por serem demolidos, para a construção de novos edifícios com oferta de melhores condições de habitabilidade. Contudo, parte da sociedade começou a olhar para os edifícios antigos de forma diferente devido à sua importância cultural e do seu potencial económico através do turismo, o que fez com que se iniciassem obras de reabilitação. Estas intervenções começaram muitas vezes por ser de tal

forma “pesadas”, que acabavam por danificar a identidade do edifício, por os quererem adaptar às exigências dos edifícios modernos. [2]

Um edifício antigo de alvenaria estrutural quando submetido a uma intervenção deve ser sujeito a uma avaliação de segurança rigorosa, através desta, deve de ser identificado o estado de degradação, e se o caso, um conjunto de alterações que impliquem cargas ou condições estruturais mais desfavoráveis do que as consideradas originalmente. Dada a particularidade e complexidade das estruturas em questão, foi criada uma metodologia para que se decida a forma de decisão mais adequada [3]:

- Anamnese - Estudo da evolução histórica bem como a recolha de dados e informações importantes;
- Diagnóstico - informação das causas das anomalias, da degradação e da avaliação da segurança estrutural;
- Terapia - escolha e aplicação das técnicas de intervenção;
- Controlo - acompanhamento e verificação da eficiência da intervenção.

A metodologia apresentada deve de ser executada segundo a ordem apresentada, e se houver necessidade, podem ser repetidas etapas.

O Comité Científico Internacional para Análise e Restauro de Estruturas do Património Arquitectónico (ICOMOS) criou o princípio da intervenção mínima no ato de reabilitação de forma a danificar ao mínimo a identidade das edificações.

Segundo Roque [4], uma intervenção numa estrutura antiga em alvenaria exige os seguintes requisitos:

- Fiabilidade estrutural global, isto é, haver estabilidade das fundações, bem como rigidez e monolitismo estrutural;
- Melhoramento das características mecânicas;

Note-se que a avaliação da segurança de uma estrutura antiga é a última fase da etapa de diagnóstico, seguindo-se a decisão da forma de intervenção. A reabilitação de edifícios antigos em alvenaria é realizada com materiais atuais, portanto, diferentes dos originais. O que faz com que se estabeleçam três características fundamentais para o reforço com materiais recentes [3,4]:

- Compatibilidade:
 - a) Mecânico-estrutural - As técnicas e os materiais utilizados não devem de provocar alterações significativas das características de rigidez da construção e do funcionamento estrutural original;

- b) Físico-química - Os materiais utilizados, apesar de poderem apresentar comportamentos físicos e químicos diferentes dos originais, não devem gerar o aparecimento de novas anomalias;
- c) Durabilidade - Necessidade de preservação de estruturas antigas por um longo período de vida, o que justifica rigorosas exigências de durabilidade;
- Reversibilidade: Talvez o termo remobilidade seja o termo mais correto, visto não existirem técnicas perfeitamente reversíveis. No ponto de vista prático, esta é uma condição difícil de ser garantida, pelo que deve ser tida em consideração apenas em monumentos de excepcional importância.

Para além destes aspetos, também deverão ser considerados, o aumento de peso da estrutura e dos seus elementos, a capacidade de solidarização com o suporte, os aspetos estéticos, os custos da solução (incluindo o de manutenção) e o período de intervenção.

2.1.1 Principais anomalias

Edifícios de alvenaria de pedra apresentam tipicamente as seguintes anomalias ou problemas [2]:

- Fraca resistência à tração - O que implica baixa resistência a esforços de flexão provocados por cargas demasiado elevadas na existência de excentricidades, como também é crítica a situação de existirem forças aplicadas fora do seu plano;
- Em paredes de três panos, o pano intermédio é normalmente constituído por materiais de fraca resistência, o que influencia não só a resistência à compressão, como também condiciona o comportamento das paredes;

Espera-se que as caldas desenvolvidas sejam utilizadas em edificações que apresentam estruturalmente anomalias relacionadas com [2]:

- Numa parede de três panos, geralmente existe uma fraca ligação transversal entre eles, possibilitando o desenvolvimento de mecanismos de rotura por instabilidade dos panos externos com a sua separação e colapso para fora do plano, tal catástrofe pode acontecer quer por ações verticais elevadas, como também por ações de cargas horizontais provocadas por um sismo;
- Baixa ductilidade e com fraca capacidade de dissipação de energia, traduzindo-se assim num mecanismo de rotura frágil;
- Deficiência ou mesmo inexistência de ligação entre elementos resistentes.

2.1.2 Principais técnicas de intervenção estrutural

Atualmente existem diversas técnicas de intervenção em alvenaria estrutural antiga. Consoante os materiais utilizados ou efeitos, as técnicas de reforço podem ser distinguidas por [4]:

- Técnicas tradicionais - estas envolvem apenas materiais e processos de construção idênticos aos originais;
- Técnicas modernas ou inovadoras - com o uso de materiais e equipamentos modernos, procuram adequar soluções mais eficientes;

Em relação aos efeitos estas diferenciam-se em [4]:

- Técnicas de reforço passivo - Os reforços entram em ação somente para cargas superiores às correspondentes ao estado de equilíbrio;
- Técnicas de reforço ativo - É exemplo o pré-esforço, neste tipo de reforço existem alterações nas condições de carga, com reação imediatas na estrutura.

Embora sejam sempre preferidas técnicas de reforço tradicionais, muitas das vezes somos impossibilitados de as executar, quer por falta de materiais idênticos aos originais, quer por falta de artesãos que façam a sua aplicação segundo as técnicas antigas, e ainda por motivos económicos. Contudo, deve de haver ponderação no recurso a técnicas inovadoras [2].

A presente investigação visa o estudo do comportamento de várias caldas no âmbito de serem posteriormente utilizadas na consolidação de paredes de alvenaria, por exemplo, de pedra compostas por três panos através da técnica de injeção. Esta técnica é geralmente aplicada em termos de reforço de estruturas que apresentam anomalias associadas aos materiais, proporcionando melhorias no que diz respeito a resistências mecânicas. No caso, melhoram-se as características da parede preenchendo os vazios do pano interno.

Saindo um pouco da linha da investigação, quando as estruturas apresentam anomalias associadas ao comportamento estrutural, parcial ou global, são usuais utilizarem-se outras técnicas de reforço, são alguns exemplos [2]:

- Refechamento de juntas com colocação de armaduras - esta técnica é utilizada em problemas relacionados com fenómenos de fluência;
- Cintagem de elementos como pilares ou paredes de alvenaria - além de melhorar o comportamento frágil, permite uma redução de deformações da estrutura;
- Pregagens transversais - são utilizadas geralmente em paredes de panos múltiplos, melhorando a ligação entre eles;

De acordo com o princípio da intervenção mínima, a injeção é uma das técnicas de eleição mostrando-se ser menos agressiva em questões de compatibilidade de materiais e durabilidade.

2.1.2.1 Injeção

A injeção é uma técnica de reforço estrutural comum em paredes de alvenaria de pedra de três panos. Esta técnica consiste em injetar calda através de furos previamente realizados nos panos externos da parede, com o intuito de preencher os espaços vazios existentes no pano interior, bem como eventuais fendas existentes nos panos externos.

Esta técnica, ao ser aplicada neste tipo de paredes, tem como principais objetivos:

- Aumentar a resistência e continuidade da parede ao serem preenchidos espaços vazios e fendas na alvenaria;
- Homogeneizar as propriedades mecânicas do pano interior em relação aos exteriores;
- Conferir ligação entre panos, ao serem preenchidos entre panos vazios mal ligados.

O meio a injetar deve possuir uma percentagem mínima de vazios superiores a 4% [5] e além disso, estes espaços devem estar interligados.

Esta técnica é irreversível, contudo, o seu resultado é praticamente invisível, preservando desta forma a identidade da estrutura. Esta revela ter um efeito passivo na estrutura, não alterando o equilíbrio de forças da alvenaria [4].

A aplicação de caldas segundo o processo de injeção em paredes de alvenaria confere-lhes melhorias significativas das propriedades mecânicas. As tabelas 2.1. e 2.2. ilustram as propriedades mecânicas de paredes não reforçadas e reforçadas pela injeção de caldas de consolidação.

Tabela 2.1 - Resumo dos resultados dos ensaios compressão uniaxial das paredes não reforçadas [2].

Parede	$f_{c,W}$ (N/mm ²)	$\varepsilon_{g,p}$ (mm/m)	$\varepsilon_{h,p}$ (mm/m)	E_g (N/mm ²)	$E_{[30-60]\%}$ (N/mm ²)
1W1	2.3	6.81	3.52	3246	780
1W2	1.7	2.86	4.10	2087	1889
2W1	1.4	9.37	2.69	1422	711
3W1	2.6	3.87	7.85	1733	1351
Média	2	5.73	4.54	2122	1183
CV (%)	27	51	50	38	47

Tabela 2.2 Resultados dos ensaios realizados nas paredes reforçadas com injeção [2].

Parede	$f_{c,w}$ (N/mm ²)	$\varepsilon_{a,p}$ (mm/m)	$\varepsilon_{h,p}$ (mm/m)	E_0 (N/mm ²)	$E_{[30-60]\%}$ (N/mm ²)
3W2	3.9	7.00	4.74	2172	1604
3W3	3.3	6.87	3.77	1844	1114
Média	3.6	6.93	4.26	2008	1359
CV (%)	11.0	1	16	12	26

Onde:

$f_{c,w}$ - Resistência à compressão;

$\varepsilon_{a,p}$ - Extensão axial pico;

$\varepsilon_{h,p}$ - Extensão axial horizontal;

E_0 - Módulo de elasticidade (determinado no intervalo de 0 a 20% da tensão resistente da parede);

$E_{[30-60]\%}$ - Módulo de elasticidade (determinado no intervalo de 30 a 60% da tensão resistente da parede);

No entanto, apesar das melhorias evidentes nas propriedades da estrutura, Blinda [5] identifica uma série de desvantagens e problemas associados à sua aplicação:

- Ausência de conhecimento da distribuição de vazios na parede;
- Dificuldade de penetração das caldas em fendas com abertura reduzida;
- Existe grande variedade de dimensão de vazios, o que dificulta a escolha da dimensão das partículas a utilizar na calda. Caso os espaços a preencher forem grandes e a calda for constituída por partículas de pequena dimensão, esta pode segregar, e na situação contrária, isto é, utilizar-se uma calda com partículas grandes em espaços reduzidos, corre-se o risco das partículas grandes obstruírem a interligação dos vazios, impedindo a injeção total;
- De forma a evitar a acumulação e retenção de ar nos vazios e mesmo a própria rotura da alvenaria, deve-se proceder a injeção com baixas pressões (max. 1,5 bar);
- Esta técnica pode tornar-se economicamente dispendiosa pela imprevisibilidade da quantidade de calda necessária.

Dependendo das características da alvenaria a injetar e da calda, o processo de injeção pode ser realizado por diferentes soluções:

- Injeção por gravidade - normalmente este tipo de injeção é utilizado em paredes fortemente danificadas e é realizado através de tubos de injeção inseridos nas fissuras ou cavidades da parede [4];
- Injeção sob pressão - frequentemente utilizadas em paredes de alvenaria, desde que estas consigam conter a pressão instalada, neste caso as caldas também são injetadas através de tubos de injeção, atuando-se por norma de baixo para cima e dos extremos ao centro da parede, de maneira a evitar desequilíbrios que possam tornar instável a estrutura [4].

Em suma, como referido, a aplicação desta técnica de reforço é complexa, requerendo uma exaustiva avaliação das paredes a injetar com o objetivo de analisar a viabilidade da injeção,

em caso afirmativo, devem-se determinar os materiais e composições de caldas que se adequem à situação. Binda [5] apresenta um esquema (figura 2.1) com um conjunto de procedimentos experimentais que devem ser realizados “in situ” e em laboratório.

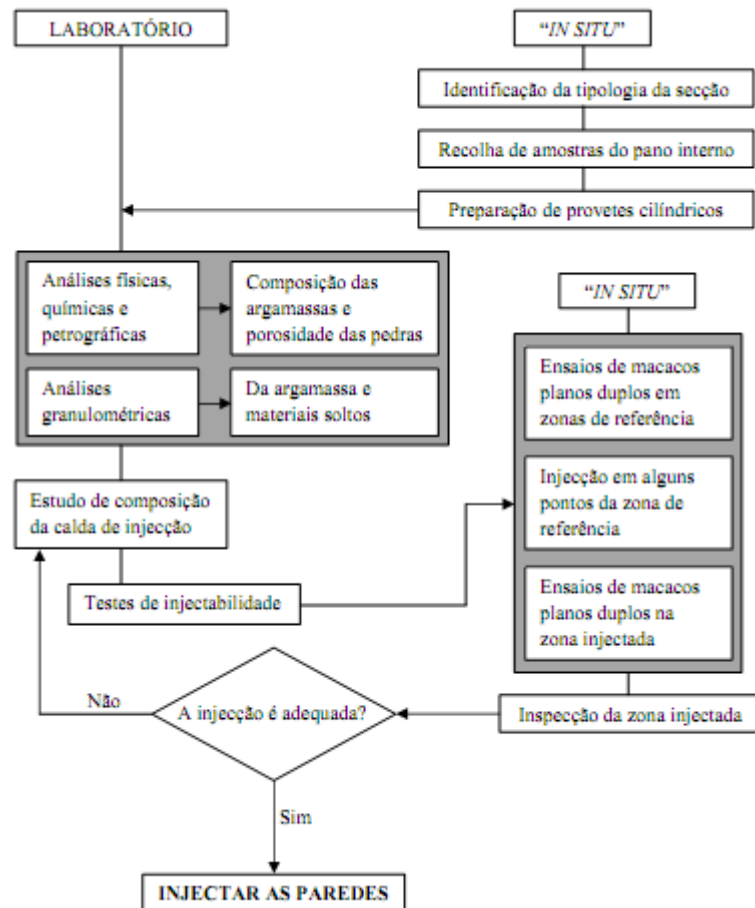


Figura 2.1 Procedimento para avaliação da adequabilidade da injeção [5]

O ato de injeção nas paredes em alvenaria deve de ser realizado aquando verificada a viabilidade da injeção e a adequabilidade da composição da calda.

Resultados experimentais têm vindo a provar que a injeção de caldas de cimento em paredes de alvenaria de pedra de três panos, além de incrementarem a resistência à compressão da mesma, provoca:

- Melhoria da ligação entre planos;
- Diminuição da dilatação horizontal, apresentando melhorias de resistência à tração nessa direção;
- Ligeiro aumento do módulo de elasticidade.

Propriedades de uma calda de injeção:

Para se proceder a injeção de uma calda numa parede em alvenaria de pedra, é importante, como referido anteriormente, existir uma boa compatibilização entre esta e o suporte onde irá ser aplicada, desta forma podem evitar-se novas deteriorações. De maneira que, as propriedades mais relevantes para caracterização das caldas de injeção para consolidação de paredes em alvenaria, são [1]:

- **Fluidez** - Capacidade de permanecer no estado fluido o tempo suficiente, enquanto ocorre a difusão homogénea nas cavidades. A fluidez depende da natureza e distribuição granulométrica das partículas, bem como do formato e superfície das mesmas, que por sua vez terá influência na água de amassadura da calda, sendo a quantidade de água e o método da mistura fatores preponderantes na fluidez da calda.
- **Estabilidade** - Capacidade da mistura permanecer homogénea, antes de ocorrer a exsudação e a segregação. A estabilidade é influenciada pela velocidade de amassadura. Esta característica pode ser melhorada quando se substitui parcialmente o ligante por adições, como por exemplo, a cal, cinzas volantes, entre outras.
- **Exsudação** - Corresponde à migração da água para a superfície, onde se forma uma película de água. Esta está inerente à relação de água com os finos utilizados na mistura, estes influenciam a quantidade de água a utilizar consoante a sua granulometria e superfície específica. Caso este fenómeno seja muito evidente, a qualidade da injeção é posta em causa visto que a parte superior de um poro injetado pode não ficar consolidada devido à migração de água em excesso para essa zona.
- **Segregação** - Corresponde à tendência dos materiais se posicionarem por estratos, esta depende da quantidade de água, da forma, da dimensão e da densidade do material fino (cimento + adições).
- **Injetabilidade** - é definida pela capacidade de escoamento da mistura e desta se manter por um certo período de tempo, onde é possível efetuar a injeção da calda com facilidade. O grau de penetrabilidade da calda varia por diversos motivos, sendo eles de origem intrínseca (granulometria da parte sólida da mistura, bem como os materiais constituintes onde a sua forma, superfície específica e finura são condicionantes) como também terá influencia o meio a injetar devido à sua capacidade de absorção/adsorção.
- **Características mecânicas** - estas características devem ser as mais adequadas ao elemento onde a calda será aplicada. A injeção deverá introduzir melhorias no que diz respeito à coesão e resistência mecânica do conjunto, contudo este incremento de resistência não deve tornar a estrutura desproporcional à original. No ato de reabilitação estrutural de edifícios antigos é necessário ter o cuidado de aumentar a resistência mecânica do conjunto, mas não demasiado a rigidez, visto que no caso da

intervenção se efetuar apenas em parte da estrutura, a rigidez ao ser aumentada significativamente não na totalidade da estrutura vai provocar uma variação do fluxo de forças podendo mesmo por em causa a estabilidade da edificação.

O quadro 2.1 resume os requisitos necessários a garantir numa calda para injeção [1].

Quadro 2.1 - Resumo dos requisitos a garantir às caldas de injeção [1]

Requisitos reológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Fluidez durante o tempo suficiente e capacidade de penetração uniforme, para que os vazios sejam preenchidos de igual forma; • Ausência de segregações, evitando-se heterogeneidades; • A exsudação deve de ser mínima, de maneira a diminuir a presença de espaços vazios com o endurecimento da mistura;
Requisitos químicos	<ul style="list-style-type: none"> • Características químicas devem ser tais, que devem de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reações irreversíveis; • *Resistente a sais de sulfato, evitando eflorescências entre outros produtos expansivos; • *O teor em álcalis deve de ser mínimo;
Requisitos físicos	<ul style="list-style-type: none"> • O tempo de início de presa da calda deve ser o necessário para que se possa realizar a respetiva injeção; • *As propriedades higroscópicas deverão ser: insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de humidade; • A calda deve apresentar baixa retração;
Requisitos mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> • Características mecânicas idênticas às dos materiais originais ou ligeiramente superiores; • *A calda deve possuir boa e adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto;
Requisitos térmicos	<ul style="list-style-type: none"> • *Pretende-se que a calda tenha baixo calor de hidratação para evitar o desenvolvimento de gradientes térmicos que possam prejudicar a aderência ao suporte.

Rui Silva [2], no estudo dos efeitos de consolidação de paredes de três panos em alvenaria de pedra utiliza uma calda comercial cujas características são:

- Massa Volúmica 1800 Kg/m^3 ;
- Tempo de escoamento no cone de Marsh < 30 segundos para 1 litro de calda;
- Resistência aos 28 dias: Flexão 4 MPa e compressão 12 MPa;
- Módulo de elasticidade 11 GPa.

Após a sua aplicação, como referido nas tabelas 2.1 e 2.2, as paredes têm um incremento de resistência à compressão uniaxial cerca de 40% (passam de 2,6 para 3,6 MPa) e o módulo de elasticidade da estrutura em alvenaria quase não sofre alterações, de 2,1 passa a 2 GPa (reduz 5%).

Capítulo 3

3 Calda económica / sustentável

Neste estudo, denomina-se calda de consolidação económica / sustentável a uma mistura fluida à base de cimento, onde este constituinte é substituído parcialmente por adições provenientes de materiais reciclados, com o objetivo de melhorar as suas características e ainda por razões ambientais e económicas.

No presente capítulo, são enunciados os materiais constituintes das caldas utilizadas neste estudo e também será apresentado o conceito de reologia aplicado às caldas estudadas.

3.1 Materiais constituintes das caldas

Neste estudo ambiciona-se formular caldas usando adições com características pozolânicas em substituição parcial do cimento, estas de diferentes naturezas, de modo a conferir à mistura as propriedades necessárias para a consolidação de edifícios históricos em alvenaria de pedra sob o processo de injeção.

De acordo com a norma NP EN447 [6], uma calda é uma mistura homogénea constituída por cimento Portland (ligante), água, adjuvantes e adições. As características dos materiais utilizados na composição das caldas sustentáveis são seguidamente apresentadas.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que misturado com água forma uma pasta que ganha presa, endurecendo devido a reações e processos de hidratação. Esta pasta depois de endurecida conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo estando submersa [7].

Os cimentos são constituídos pela combinação de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, provenientes do calcário, da argila e do gesso. Estes ligantes apresentam aproximadamente a seguinte composição [8]:

- Cal (CaO) 60 a 67%
- Sílica (SiO_2) 17 a 25%
- Alumina (Al_2O_3) 3 a 8%
- Óxido de ferro (FeO) 0,5 a 6%

Existem várias gamas de cimento Portland consoante a proporções dos componentes básicos referidos. As matérias-primas utilizadas são o calcário (CaCO_3) e a argila que contém óxidos de silício, alumínio, ferro, magnésio, entre outros.

O cimento tipo Portland é obtido da moagem do clínquer ao qual é adicionado gesso (CaSO_4). O clínquer resulta da calcinação (a 1450°C) da mistura do calcário (75 a 80%) e argila (20 a 25%). Desta forma o cimento Portland é formado essencialmente por compostos que possuem cálcio e sílica na sua composição. Outros minerais surgem como impurezas [9].

Os seus principais constituintes são os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), os aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF) e gesso para que a presa instantânea provocada pela reatividade do C_3A seja retardada [9].

O cimento em contacto com a água dá origem a um novo sistema de compostos hidratados (C-S-H) estáveis que cristalizam conferindo em conjunto resistências elevadas. O endurecimento inicial da pasta é caracterizado pela hidratação dos aluminatos e sendo os silicatos responsáveis pela evolução da resistência. Contudo o processo de hidratação do cimento é complexo e ainda hoje não está totalmente compreendido, existindo diversas teorias para certos fenómenos envolvidos [7].

3.1.1.1 Desvantagens do uso de cimento Portland

Apesar de o cimento Portland ser o ligante mais utilizado a nível mundial, este apresenta uma série de desvantagens seguidamente anunciadas [10]:

- Os fornos de clínquer atingem elevadas temperaturas (1500°C) consumindo assim muita energia na fase de fabrico;
- Emite grandes quantidades de CO_2 , agravando a poluição ambiental;
- Com a descalcificação do betão pelo desaparecimento do hidróxido de cálcio (combinado ou dissolvido) o PH desce, podendo afetar a integridade das armaduras de um betão armado; [8]
- Devido à considerável permeabilidade à penetração de cloretos, pode existir a possibilidade de o meio alcalino ser reduzido pondo-se em causa as armaduras;
- Baixa resistência ao ataque de sulfatos, que provocam reações do tipo expansivo;
- Conjuntamente com o agregado podem gerar-se reações expansivas alcális-agregados, estas manifestam-se lentamente;
- Não é muito aconselhável a trabalhos de reparação, devido à apreciável retração;
- As condições da aplicação em obra afetam as suas características, podendo agravar a sua exposição e fragilidade aos agentes agressivos;

3.1.2 Superplastificante

A utilização de adjuvantes em betões e argamassas surgiu com a utilização do próprio cimento entre outros aglomerantes hidráulicos. Os romanos adicionavam clara de ovo, sangue, banha ou leite aos betões e argamassas, no âmbito de melhorarem a trabalhabilidade das misturas [11].

No início dos anos 60, foram introduzidos no mercado adjuvantes à base de melamina e naftaleno no Japão e na Alemanha [12]. Contudo, continuaram a ser desenvolvidas pesquisas, e depois da década de 90 surgiu uma grande inovação na tecnologia dos dispersantes de cimento, definidos por superplastificantes à base de policarboxilatos. Estes permitem aumentar significativamente a fluidez das misturas com o consumo de água constante [13].

Estes superplastificantes de alta eficiência à base de policarboxilatos promovem grande dispersão dos finos da mistura possibilitando elevadíssimo aumento do índice de consistência, fluidez, bem como a trabalhabilidade com elevada redução da quantidade de água da amassadura.

A ação química de um superplastificante normal consiste em três fases [14]:

- Adsorção superficial
- Carga eletrostática sobre a partícula de cimento
- Dispersão

O adjuvante envolve um sistema de partículas carregando-o com cargas do mesmo sinal. Gerando efeito da repulsão eletrostática, o superplastificante vai dispersar as partículas de cimento, reduzindo-se assim água para se atingir uma dada trabalhabilidade (figura 3.1).

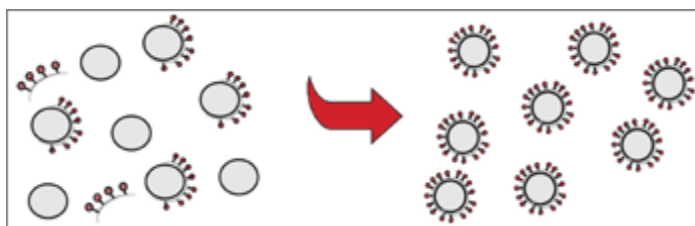


Figura 3.1 - Ação de um superplastificante normal [14]

Iniciado o processo de hidratação do cimento o efeito de dispersão é minimizado, fazendo com que a mistura perca trabalhabilidade, necessitando de água para manter a mesma trabalhabilidade (figura 3.2).

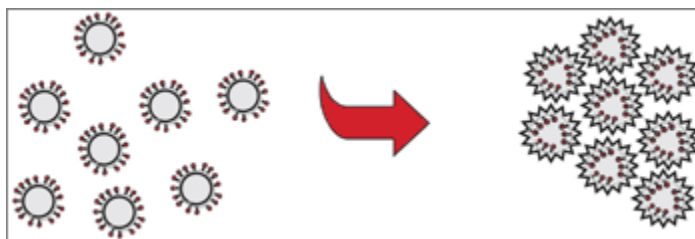


Figura 3.2 - Perda de trabalhabilidade de um superplastificante normal

O superplastificante à base de policarboxilato atua de forma mais completa nas partículas de cimento. Além da ação eletrostática conseguida pelo carregamento das partículas de cimento de cargas de mesmo sinal, este também possui longas cadeias laterais (“side chains”), responsáveis pelo chamado efeito estérico. Essas longas cadeias laterais aumentam o espaço físico em um sistema de partículas de cimento, resultando em uma redução de água (acima de 40 %) muito superior aos superplastificantes normais (figuras 3.3 e 3.4).

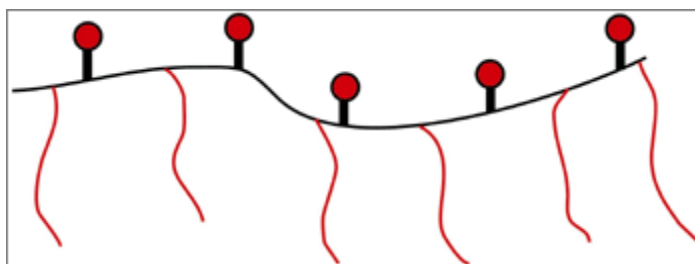


Figura 3.3 - Molécula de um Policarboxilato

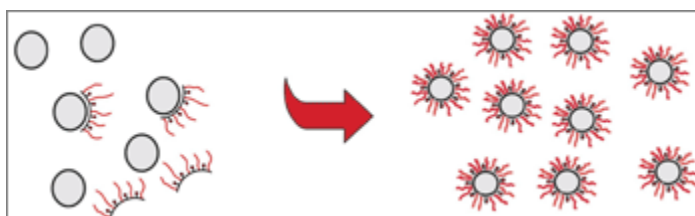


Figura 3.4 - Ação do policarboxilato sobre as partículas de cimento

Outra grande vantagem por consequência das longas cadeias laterais do policarboxilato é a manutenção da trabalhabilidade por longos períodos de tempo. Com o início do processo de hidratação do cimento, perde-se o efeito da repulsão eletrostática do adjuvante, mas através da presença das mesmas, consegue-se minimizar esse efeito. (figura 3.5)

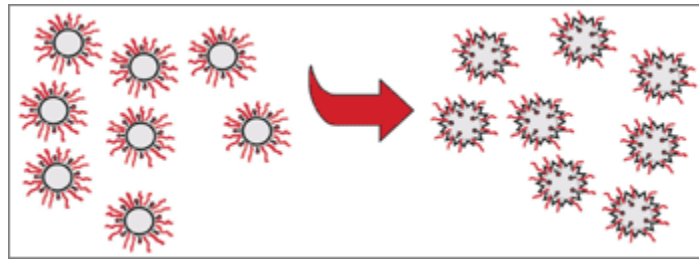


Figura 3.5 - Manutenção da trabalhabilidade devido ao efeito estérico

O policarboxilato torna-se assim o produto ideal para certos tipos de aplicações possuindo as seguintes vantagens:

- Redução de água até 45 % da água de amassamento
- Deixa o betão coeso e trabalhável
- Redução linear da água de amassadura
- Possibilidade de se trabalhar com razões a/c inferiores a 0,30
- Minimiza a exsudação
- Não tem efeito significativo no tempo de presa do cimento
- Mantem a plasticidade
- Não possui incompatibilidades químicas
- Aumento das resistências à compressão iniciais e finais
- Aumento da durabilidade estrutural
- Permite a execução de betões auto-compactáveis com dosagens relativamente baixas

3.1.3 Adições

Segundo a Norma Portuguesa NP EN 206-1 [15], adições são materiais inorgânicos que se adicionam ao cimento Portland com o objetivo de melhorar as suas características e ainda por razões ambientais (a maioria das adições provêm de resíduos industriais, e o seu uso no betão evita que sejam lançados no ambiente, bem como o seu uso na substituição parcial do cimento reduz a produção de clínquer que por sua vez reduzirá a emissão de CO₂ na atmosfera) e económicas (adições são utilizadas em substituição parcial do cimento, influenciando o custo final devido ao menor consumo de cimento). A norma inicialmente mencionada, considera a existência de dois tipos de adições, as do tipo I - Quase inertes, é exemplo o fíler calcário, e adições do tipo II - pozolânicas ou potencialmente hidráulicas, por exemplo cinzas volantes, escórias de alto-forno, metacaulino, pó cerâmico e pó de vidro.

Com a substituição parcial do cimento por adições conseguem-se resultados satisfatórios em termos de comportamento reológico, resistência à ocorrência de segregação, resistência mecânica e também em relação à microfissuração.

Para acabar a breve e positiva descrição do uso de adições, é de referir que a utilização destas é igualmente vantajosa tanto ao nível da durabilidade como da trabalhabilidade e retração por secagem [16]. A seguir descreve-se as características gerais das adições que se pretende utilizar neste estudo.

3.1.3.1 Adições quase inertes

a) Fíler calcário

O fíler calcário é uma adição constituída por partículas finamente moídas, de natureza calcária. Estas partículas possuem dimensões em torno de 0,125 mm. Este proporciona um efeito físico e um efeito químico à mistura. O efeito físico ocorre devido à sua finura, preenchendo espaços vazios existentes entre as partículas de cimento. O efeito químico ocorre pelo fato de o material não ser verdadeiramente inerte, contribuindo para a formação de monocarboaluminatos de cálcio, com propriedades aglutinantes, mas são de menor intensidade que o C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Outro efeito químico produzido pelo fíler calcário é de acelerar a hidratação dos minerais do clínquer, especialmente o C_3S , contribuindo para o aumento da resistência da calda.

Alguns estudos [16,17] demonstram que o fíler calcário possui superfície dotada de estrias e a sua forma é mais ou menos retangular. Isto o coloca numa situação intermediária em relação a outras adições. Quanto mais irregular for a forma, maior será a necessidade de água e por consequência, a porosidade da mistura. O fíler calcário deve ter finura igual ou menor que a do cimento, porém, quando o diâmetro médio das partículas é muito pequeno, menor do que 1 mm, pode acarretar aumento expressivo da tensão de cedência da calda. Segundo SONEBI et al. [18], a utilização de fíler calcário em grandes quantidades pode diminuir a ocorrência de exsudação e segregação.

3.1.3.2 Adições pozolânicas

O termo pozolana foi originalmente atribuído aos materiais que reagem com a cal na presença de água à temperatura ambiente. Estes são de origem vulcânica com características similares aos da cidade italiana Pozzuoli. No decorrer do tempo, a definição foi estendida a materiais com origens distintas, contudo, apresentando um comportamento semelhante [19].

Atualmente, considera-se pozolânico o material que é inorgânico e que por si só não apresenta atividade hidráulica, sendo este de origem natural ou artificial, silicoso ou aluminosilicoso. Este quando finamente moído, reage com o hidróxido de cálcio formado no processo de hidratação do cimento. Esta reação decorre com a presença de água formando-se assim compostos de silicato e alumínio de cálcio desenvolvendo-se resistência [7].

A existência de reatividade pozolânica está ligada à estrutura interna da pozolana, sendo a reatividade mais elevada consoante a sua estrutura interna esteja mais afastada do estado

cristalino, portanto é necessário que a alumina e a sílica não estejam em elevado grau de cristalinidade [7].

O estado da superfície do material pozzolânico é determinante para o início da reação. Sendo vantajoso ter-se a maior área superficial possível em contacto com o hidróxido de cálcio. Habitualmente a superfície específica destes materiais é de duas a três vezes superior à do cimento Portland, isto é de 600 a 1000 m²/Kg [20].

Existem três pontos preponderantes para o uso de materiais pozzolânicos em substituição parcial do cimento Portland. Com o uso desta adição o calor de hidratação é menor, diminuindo a velocidade de reação que por consequência fará com que a pasta tenha menos problemas de fissuração. A figura 3.6 mostra a diminuição do calor de hidratação com o aumento de substituição de cimento Portland por uma pozzolana natural.

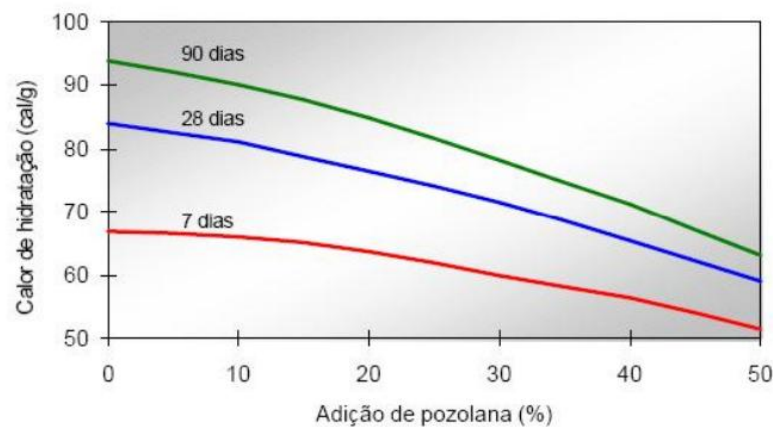
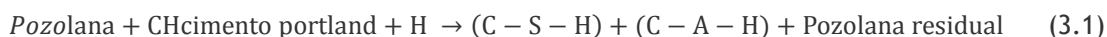


Figura 3.6 - Efeito da substituição de uma pozzolana natural sobre o calor de hidratação [21]

O segundo ponto é que a reação pozzolânica consome hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento Portland contribuindo para a durabilidade da pasta endurecida. Este hidróxido pode ser lixiviado pela água, aumentando desta forma a porosidade da pasta que por sua vez ficará mais suscetível a ataques de agentes nocivos [22].

O terceiro aspeto tem a ver com as partículas finamente moídas que não reagem com os produtos de hidratação do cimento e outros compostos formados durante a reação pozzolânica (é exemplo o aluminato de cálcio hidratado (C-A-H)) que atuam apenas como fíler, reduzindo desta forma a porosidade da estrutura resultante. A combinação entre o efeito fíler e pozzolânico proveniente da reação pozzolânica tem um contributo positivo na resistência bem como na durabilidade da pasta endurecida frente a meios ácidos [23].



onde:

$\text{CH}_{\text{cimento Portland}}$: Hidróxido de cálcio do cimento Portland

H: Água

(C-S-H): Silicato de cálcio hidratado

(C-A-H): Aluminato de cálcio hidratado

Em termos de classificação as pozolanas podem ser naturais, artificiais, subprodutos industriais e subprodutos da agricultura. No presente trabalho utilizar-se-ão pozolanas artificiais, estas não possuem à partida propriedades pozolânicas, ganhando-as aquando aquecidas a temperaturas entre 500 e 900 °C [24].

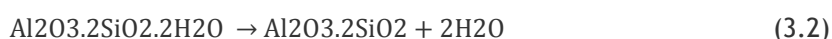
A NP EN 197-1 [24] considera dois tipos de pozolanas artificiais, xisto cozido (T) e pozolana natural calcinada (Q). As do último tipo (Q), provêm de materiais de origem vulcânica, argilas, xistos ou rochas sedimentares, ativados por tratamento térmico. Entre estes, estão as adições utilizadas para substituição parcial do cimento nesta investigação, estas são:

a) Metacaulino; b) Pó cerâmico e c) Pó de vidro

a) Metacaulino

O Metacaulino resulta da desidroxilação do caulino, tornando o material muito mais reativo, conferindo-lhe também propriedades pozolânicas. É usual a substituição parcial do cimento Portland por esta adição potenciando-se as reações pozolânicas [25], esta é comercializada em alguns países com essa finalidade. Nos EUA (PoerPozz-HRM), na Alemanha (Trollit) e na Nova Zelandia (MetaMax)[26].

O caulino aquando submetido a um tratamento térmico de desidroxilação surgem alterações na estrutura molecular que propiciam melhores condições de combinação. A caulinite (mineral da argila que é o principal constituinte do caulino) é estruturalmente caracterizada pela justaposição de duas lâminas T-O, a tetraédrica de silício e octaédrica a de alumínio e/ou magnésio onde o alumínio está em coordenação com dois átomos de oxigénio e 4 hidroxilos (OH) apresentando comportamento estável. A desidroxilação do caulino dá-se quando este é aquecido a uma temperatura entre 500 e 900 °C durante um intervalo de tempo longo. A desidroxilação consiste na perda dos hidroxilos (OH), que se agrupam dois a dois, libertando uma molécula de água (H₂O) e deixando no seu lugar um átomo de oxigénio. Neste processo térmico a estrutura octaédrica de alumínio passa a ser maioritariamente tetraédrica. Após a desidroxilação, o metacaulino adquire uma estrutura marcadamente amorfa e um potencial de reatividade muito pronunciado. A reação base é a seguinte [10]:



(caulinite)

(metacaulinite)

O metacaulino depende da composição química e mineralógica do caulino base, de um modo geral este apresenta diferentes graus de finura com maiores ou menores superfícies específicas e pode possuir cor branca, creme ou levemente rosada [10].

O metacaulino é consideravelmente mais fino que o cimento, apresentando uma superfície específica aproximada de $2090 \text{ m}^2/\text{Kg}$ (a S.E do cimento é aproximadamente $370 \text{ m}^2/\text{Kg}$), esta finura pode ainda ser melhorada artificialmente por moagem, podendo-se atingir superfícies específicas superiores a $3000 \text{ m}^2/\text{Kg}$ influenciando em princípio a reatividade do material [10].

A utilização do metacaulino induz elevada retração devido à grande capacidade de fixação de água. A retração pode gerar pré-tensões no provete que por sua vez poderá melhorar resistências mecânicas, especialmente à tração. [10]

Em suma, o metacaulino é produzido em laboratório por tratamento térmico, cuja temperatura é aproximadamente 750°C , esta temperatura é sensivelmente metade da necessária para a produção do cimento Portland, o que reduz consideravelmente os gastos energéticos e por sua vez serão menores as emissões de dióxido de carbono (CO_2), além de que no processamento de metacaulino apenas se liberta água, enquanto no do cimento é CO_2 .

b) Pó cerâmico proveniente da reciclagem de telhas

A descrição das características genéricas da argila, a matéria-prima principal para fabricação de telhas cerâmicas, neste trabalho, vem de encontro à ideia aqui perseguida de estimular a reciclagem dos resíduos provenientes da demolição e da indústria cerâmica.

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina e adquire plasticidade quando em contato com água. Esta é constituída principalmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro, magnésio entre outros. As argilas também contêm matéria orgânica, sais solúveis, partículas de quartzo, mica muscovita, pirita, calcita, dolomita e outros materiais residuais [27].

O processo de fabrico de telhas decorre em várias fases, primeiramente a argila é amontoada e depois britada até atingir a granulometria necessária, sendo novamente amontoada durante vários dias ou mesmo meses. Antes do processamento, o teor de humidade é controlado e pode ser necessário adicionar água para obter a consistência certa para a modelagem. O processamento de telhas pode ser em duas fases, em que uma segunda fase pode decorrer após a extrusão, dependendo do tipo de telha que se pretende fabricar. Por exemplo, nas telhas mistas a argila extrudida é prensada entre dois moldes. A argila, ainda nos moldes, é seca para reduzir o seu teor em humidade e levada aos fornos para a cozedura, onde a temperatura varia dos 850 aos 1050°C . Depois de terminada a cozedura e após o

arrefecimento, os produtos são embalados e estão prontos a ser enviados. O processo está sujeito a um rigoroso controlo da qualidade durante todas as fases de fabrico [28].

Para efeitos de reciclagem, aproveitam-se telhas de telhados que tiveram de ser levantados por diversos motivos, como por exemplo demolições. A estas telhas podem ser utilizadas um conjunto de técnicas com o intuito de reduzir o material em pequenos fragmentos, que por sua vez serão moídos até atingirem a finura pretendida. A finura é um parâmetro importante para avaliar a reatividade do resíduo cerâmico, pois eleva a superfície específica, e com o aumento da área de contato a reatividade aumenta. Este resíduo quando finamente moído apresenta atividade pozolânica, podendo assim ser utilizado para produção de novos materiais cimentícios [29]. Esta finura tem influência na necessidade de água para uma determinada consistência, e quanto maior a quantidade de água, menor será a resistência à compressão para um mesmo tipo e mesma relação de cimento/pozolana [29].

Ao substituir-se cimento por resíduo cerâmico há uma redução do cimento e consequentemente uma redução do hidróxido de cálcio disponível para a reação pozolânica. Com a redução da disponibilidade de hidróxido de cálcio para reação, pode haver excesso de partículas de pozolana, este excesso passa a atuar como partícula inerte agindo como fíler. Desta forma a quantidade de produtos hidratados na mistura é reduzida [30]

Arginaldo Junior [29] no seu estudo prático, verificou que caso a percentagem de substituição do cimento por pó cerâmico seja superior a 20%, serão evidenciadas reduções de resistência à compressão aos 28 dias, contudo, realça que no decorrer do tempo desenvolvem-se lentamente reações pozolânicas que irão conferir acréscimos de resistência à pasta.

Do estudo efetuado por Araujo Junior & Rondon [31] verificou-se que o pó cerâmico obtido pela moagem de resíduos da indústria de cerâmica vermelha (telhas) apresenta boas propriedades mineralógicas e atividade pozolânica. Assim sendo, afere-se que existem condições para se utilizar o pó cerâmico em caldas, argamassas e betões.

c) Pó de vidro

O aproveitamento do vidro moído em substituição parcial do cimento Portland é uma forma interessante de reciclagem. Ao contrário das vidrarias, esta pode ser realizada com a mistura de cacos de vidro de cores diferentes.

O vidro resulta da fusão de uma mistura de vários materiais inorgânicos naturais, seguida de um arrefecimento de forma controlada, obtendo-se um material duro, homogéneo, estável, inerte, amorfo e isotrópico [32].

Na produção de vidro sodo-cálcico, normalmente são utilizadas como matérias-primas a areia, o calcário, a dolomite, o feldspato, a alumina calcinada, hidróxido de cálcio e vidro reciclado

(casco), a percentagem de casco utilizada varia consoante o fabricante, usualmente entre 25 e 30% [33].

De uma maneira geral, o casco de vidro finamente moído é favorável ao desenvolvimento de reações pozolânicas, este é composto maioritariamente por sílica amorfa (cerca de 70%) e quantidades inferiores de sódio e cálcio. Comparativamente às cinzas volantes, o vidro tem mais SiO_2 , CaO e Na_2O , mas menor quantidade de alumínio e ferro (Al_2O_3 e Fe_2O_3) [34].

Vários estudos têm vindo a ser feitos de forma a viabilizar o uso de vidro como substituição parcial do cimento e agregados finos [35,36]. No caso de ser substituído pelo agregado fino, a expansão do betão é tanto maior quanto menor for o diâmetro das partículas, contudo, não se verificam reações expansivas relevantes quando a adição tem diâmetro inferior a $75\text{ }\mu\text{m}$ [35,36]. Ao utilizar-se pó de vidro em substituição parcial do cimento, embora o conteúdo inicial em álcalis seja substancialmente maior, a expansão por reação álcali-sílica é muito inferior, Taha e Nounu [37] justificam este fenómeno explicando que o consumo de álcalis para formar gel de silicatos de cálcio hidratados durante a reação pozolânica ocorre mais cedo do que a reação álcali-sílica, e por este motivo, como ilustra a figura 3.7, não existirá álcalis suficiente para alimentar a reação álcali-sílica.

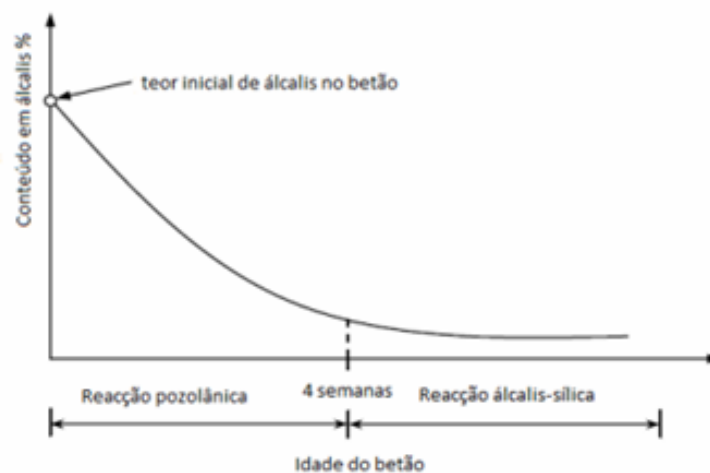


Figura 3.7 - Modelo ilustrativo do consumo de álcalis na reação pozolânica durante as primeiras 4 semanas [38]

Em relação a resistências, tal como as adições anteriores com características pozolânicas, as resistências mecânicas diminuem à medida que se aumenta a substituição parcial de cimento, e em idades mais avançadas são verificados melhoramentos de resistência. A utilização desta adição aumenta a resistência da pasta à penetração de cloretos. Esta resistência aumenta ao longo do tempo, na medida que a reação pozolânica fica mais completa [39].

Portanto, é aconselhada a utilização da adição de vidro na substituição parcial de cimento, desde que as partículas sejam finas ($<75\ \mu\text{m}$), proporcionando-se assim reações pozolânicas sem comprometer a pasta com reações álcali-sílica [35,36].

A utilização de pó de vidro em substituição parcial do cimento pode trazer os seguintes benefícios ambientais [40]:

- Ao utilizarem-se resíduos têm-se vantagens económicas e ambientais, reduzindo-se os custos de sua eliminação, que são suscetíveis de aumentar devido ao imposto de aterro;
- Não se gastam grandes quantidades de matérias-primas;
- Prolonga a longevidade dos aterros;
- Reduz gastos energéticos como também emissões de CO_2 , NO_x e outros poluentes do ar emitidos pelos fabricantes de clínquer;

3.1.4 Água

A água é um elemento necessário na preparação de uma calda. Esta, quando adicionada ao cimento, reage, formando uma série de compostos químicos hidratados capazes de conferir resistência mecânica ao sistema água-cimento. Além da hidratação do cimento, esta também vai influenciar a fluidez e viscosidade da pasta. A viscosidade diminui com o aumento da quantidade água da amassadura. A água quando utilizada em elevadas quantidades pode prejudicar a segregação da mistura [51,52].

A composição química da água pode afetar as propriedades e desempenho das caldas, esta ao estar contaminada pode influenciar as características da mistura, e por sua vez colocará em causa a integridade da estrutura [41].

Conforme recomenda a especificação do LNEC E372 [43], a água de amassadura deve de ser inodora e sem gosto. Em obra, geralmente utiliza-se água da rede pública de abastecimento.

3.2 Comportamento reológico de caldas cimentícias

De uma maneira geral a Reologia pode ser definida como a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, avaliando as relações entre a tensão de corte aplicada e a deformação em determinado período de tempo. Sendo o comportamento reológico dos materiais representado pela relação entre o fluxo e as forças que são submetidas [44].

O fluxo está relacionado com as camadas adjacentes dos elementos de um fluido, pelo que ao aplicar-se uma força de corte num fluido é induzido um gradiente de velocidade. O fator de proporcionalidade entre a força e o gradiente de velocidade é denominado por viscosidade e o gradiente de velocidade é igual à taxa de deformação [45].

Um fluido que obedece a esta relação é denominado por newtoniano e comporta-se da seguinte forma, $\tau = F/A = \eta \dot{\gamma}$ onde τ é a tensão de corte, F é a força de corte e A a área do plano paralelo à força, η é a viscosidade, e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação [54,55].

No caso da reologia de suspensões, há um aumento de viscosidade devido às partículas sólidas presentes no fluido perturbarem as linhas de fluxo, aumentando assim a resistência do sistema ao escoamento. As características reológicas das suspensões são influenciadas pelos seguintes fatores [1]:

- Concentração volúmica de sólidos;
- Características do meio líquido;
- Temperatura;
- Tempo decorrido desde o início da mistura;
- Características físicas das partículas (distribuição granulométrica, densidade, morfologia, área superficial e rugosidade);
- Tipo de interação das partículas com o meio (estado de dispersão);

No caso de misturas, que possuem elevada concentração de partículas, a reologia do sistema apresenta um comportamento não linear, o que os afasta do modelo ideal de Newton.

Ostwald [46] apresenta um modelo para fluidos de comportamento não linear que pode ser descrito matematicamente pela equação 3.3.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3.3)$$

Onde:

η - Viscosidade plástica aparente

n - Índice da Lei das Potências

$\dot{\gamma}$ – Taxa de velocidade

Os fluidos que seguem este modelo são conhecidos por fluidos da Lei das Potências. Estes, consoante o índice n for maior, igual ou inferior a 1 podem ser respetivamente fluídos dilatantes (1), Newtonianos (2) ou plásticos (3) (figura 3.8) [47]

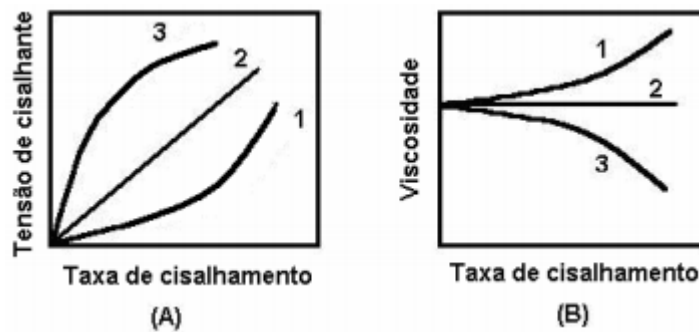


Figura 3.8 - Curvas de fluxo da Lei das Potências [47]

Num fluido dilatante a viscosidade do sistema aumenta com a tensão de corte, sendo este um comportamento típico de suspensões concentradas, enquanto num plástico acontece o oposto, a viscosidade diminui com a tensão de corte [47].

No entanto, existem fluidos que são caracterizados pela existência de um valor de tensão residual ao corte que deve de ser excedida para que o material apresente um fluxo viscoso. Estes são conhecidos por fluidos de Bingham. São exemplos sistemas com alta concentração onde a interação entre partículas exerce um papel fundamental (lama e polpa de fruta). A seguinte equação 3.4 descreve o modelo matemático proposto por Bingham.

$$\tau = \tau_y + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad (3.4)$$

Onde:

τ_y - Tensão de cedência

η_p - Viscosidade plástica

$\dot{\gamma}$ - Taxa de velocidade

É ilustrado um exemplo de diagrama para um fluido de Bingham



Figura 3.9 - Curvas de fluxo dos fluidos Newtoniano e de Bingham [47]

O modelo de Hershel-Bulkley (equação 3.5) modifica o de Bingham no intuito de explicar o comportamento de fluidos com concentrações de partículas ainda mais elevadas do que as anteriormente referidas. Neste, à tensão de cedência é somado o termo da Lei da Potência [47]:

$$\tau = \tau_y + \eta \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3.5)$$

A figura 3.10 apresenta um gráfico que resume o comportamento de fluidos independentes do tempo.

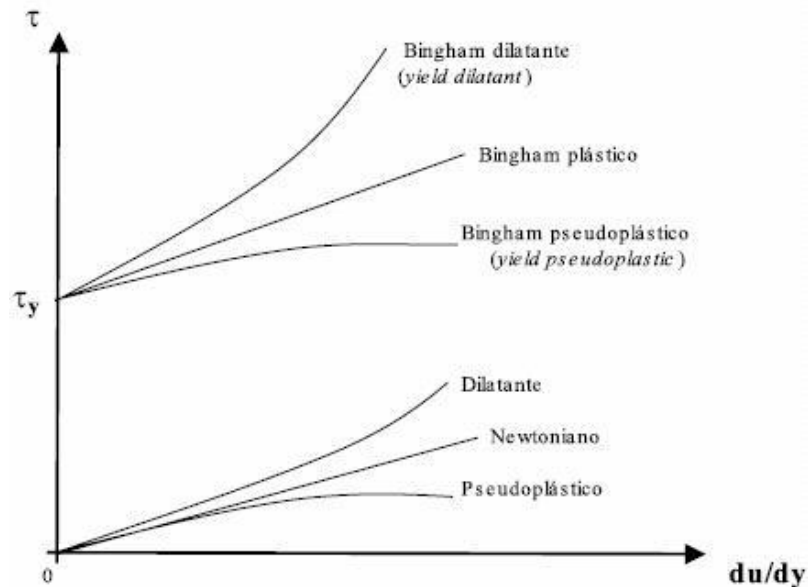


Figura 3.10 - Curvas de fluxo de diferentes fluidos [63]

Mais autores (identificados na tabela 3.1) efetuaram estudos do comportamento dos fluidos, dirigindo-os à descoberta de novos modelos. O produto final é apresentado na seguinte tabela 3.1, no entanto, não será efetuada uma análise aprofundada às expressões resultantes do trabalho árduo de cada autor.

A tabela 3.1 apresenta diferentes expressões, frequentemente usadas para caracterizar o comportamento reológico de fluídos e suspensões, que relacionam a tensão de corte com o gradiente de velocidade. Da análise das expressões apresentadas, verifica-se que as equações propostas por Bingham, Herschel e Bulkley e Von Berg e Oswald-de-Waele, incorporam um segundo fator caracterizador da reologia: a tensão de cedência [1].

Tabela 3.1 - Expressões que caracterizam o comportamento reológico de fluidos e suspensões [1].

Autor	Expressão
Newton	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Herschel e Bulkley	$\tau = \tau_0 + k \eta \dot{\gamma}$
(Lei da potência)	$\tau = A \dot{\gamma}^n$
Von Berg e Oswald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + B \sin^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Eyring	$\tau = a \dot{\gamma} + B \sin^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni, Massida e Sanna	$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \sigma$

Para fluidos Não Newtonianos existem fenômenos que são dependentes do tempo, tais como [47]:

a) Tixotropia; b) Reopexia; c) Viscoelasticidade;

a) Fluidos Tixotrópicos:

Nos fluidos tixotrópicos a viscosidade aparente do líquido diminui na medida que se aumenta a tensão de corte, isto depende principalmente da orientação das partículas/moléculas no alinhamento com a direção do fluxo. Esta orientação pode deixar de existir após algum tempo [57,58].

O fluido tixotrópico é definido pelo potencial que tem a estrutura de se reorganizar quando a substância é deixada em repouso por um dado período de tempo. Para estes materiais, qualquer que seja a tensão de corte aplicada, existirá um tempo necessário para a viscosidade cair e depois manter-se constante. O tempo necessário para que a viscosidade aparente se mantenha constante é denominado de “tempo de estabilização” (Te), e depende da tensão de corte imposta ao fluido [57,58].

A tixotropia é uma das mais importantes características em tintas, produtos alimentícios, cosméticos, produtos farmacêuticos e outros [48].

Nos fluidos tixotrópicos, a curva da histerese do fluxo de ida encontra-se acima da curva de volta, como ilustra a figura 3.11 [57,58].

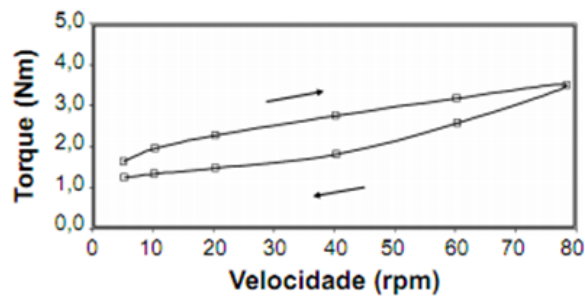


Figura 3.11 - Curva histerese de um betão de alta resistência [47].

b) Fluidos reopéxicos:

Os fluidos reopéxicos apresentam comportamento oposto aos fluidos tixotrópicos. Estes fluidos são caracterizados pelo incremento da viscosidade com o tempo, a uma dada tensão de corte. Nos fluidos reopéxicos, a curva da histerese do fluxo é inversa a dos fluidos tixotrópicos, com a curva de volta acima da curva de ida. Enquanto a tixotropia é um comportamento muito comum em vários fluidos, a reopéxia é rara [57,58].

Estes fluidos ao serem deixados em repouso podem atingir viscosidades inferiores à original. Este ciclo pode ser repetido indefinidamente com posterior recuperação da viscosidade [48].

A figura 3.12 apresenta o comportamento da viscosidade em função do tempo em que é exercida a tensão de corte.

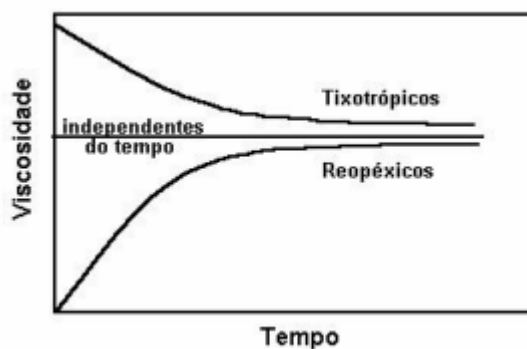


Figura 3.12 - Curvas de fluxo para fluidos reopéxicos e tixotrópicos [47]

c) Fluidos viscoelásticos:

É considerado um fluido viscoelástico, aquele que retorna parcialmente ao seu estado original após a deformação, quando a tensão é retirada.

A descrição do comportamento viscoelástico dos materiais é feita através de equações diferenciais que combinam três termos: a) a deformação elástica; b) a taxa de deformação viscosa; c) um termo inercial de deformação.

Reómetro

Para a avaliação das propriedades reológicas dos fluidos e suspensões são utilizados equipamentos designados por reómetros. Estes permitem estudar o comportamento da tensão de corte e da viscosidade plástica em função de outras variáveis, como por exemplo o tempo e temperatura. Os reómetros são equipamentos precisos, apresentam geometrias que são adequadas para a avaliação de formulações durante a mistura e o transporte, simulando condições de escoamento turbulento. Essa precisão é tão útil para investigação como para estudos práticos e medidas de controlo de qualidade do material. Eles fornecem muito mais informações do que os ensaios empíricos convencionais, reduzindo os custos com material e mão-de-obra. O ensaio é totalmente automatizado e controlado por computador obtendo-se novamente informações mais objetivas do que nos ensaios convencionais [49].

Os reómetros disponíveis no mercado baseiam-se essencialmente em dois princípios básicos de funcionamento [49]:

- Reómetro em que o torque aplicado ao fluido é controlado, sendo avaliado a tensão de corte resultante - indicado para avaliações em que a tensão de cedência é a principal propriedade a ser determinada;
- Reómetro em que a tensão de corte aplicada ao material é controlada, sendo registrada a força necessária para tal. Indicado para avaliações do comportamento da viscosidade do material sob diversas tensões de corte;

Para que os resultados sejam precisos, os fluidos a utilizar nos reómetros devem ser homogêneos.

Um dos reómetros utilizados no ensaio da reologia de pastas é o Viskomat NT, este é um viscómetro rotacional versátil para determinação da trabalhabilidade de materiais de grão fino utilizado na construção civil, tais como, caldas, argamassas, betões com agregados de granulometria reduzida, gesso, entre outros com uma máxima dimensão de partícula 2 mm.

O Viskomat NT é um controlador de viscosidade com alta precisão. Cada rotação é composta por 200 *steps*, permitindo que se façam perfis em rampa onde a velocidade de rotação pode variar dos 0.001 rpm para 200 rpm, para que se obtenham as curvas de fluxo e pontos de cedência que caracterizam os fluidos. O esforço de torção até +/- 250 N.mm é medido através de um sensor especial incutido no reómetro [50].

3.3 Conclusão

Da pesquisa bibliográfica efetuada para este estudo, apreendeu-se que para o reforço de paredes de alvenaria de pedra através da injeção de caldas de consolidação, são necessários efetuar estudos prévios onde se avaliam as paredes e a viabilidade do reforço pela técnica referida. Em caso positivo, deve-se determinar os materiais e a composição das caldas a utilizar para que estas sejam compatíveis com o suporte a consolidar.

As caldas quando submetidas a grandes percentagens de substituição de cimento por adições têm tendência a sofrer reduções de resistência, no entanto existem adições com propriedades pozolânicas que desenvolvem compostos resistentes ao longo do tempo, possibilitando que após os 28 dias de idade se confirmem aumentos de resistência.

Com o intuito de viabilizar o uso de calda de injeção de baixo custo para consolidação e alvenarias, propõe-se um estudo experimental para avaliar o comportamento das caldas com 50% de substituição de cimento por adições. Destas adições, duas (fíler calcário, metacaulino) são industrializadas e outras duas (pó cerâmico e pó de vidro) são obtidas a partir de resíduos industriais e urbanos em seguida beneficiadas em laboratório. A descrição e a discussão do trabalho experimental realizado no laboratório de tecnologia e ensaios mecânicos da UBI é objeto dos capítulos seguintes.

Capítulo 4

4 Descrição do Programa Experimental

Com este capítulo pretende-se descrever a metodologia utilizada na realização deste trabalho. Neste, são apresentados os materiais utilizados na constituição das caldas e também são descritos os métodos experimentais e respetivos procedimentos. Esta investigação visa o desenvolvimento de um estudo experimental para definição da composição de caldas de baixo custo, baseadas no uso de materiais recicláveis e análise das suas propriedades reológicas, com o objetivo destas serem utilizadas na consolidação de alvenarias históricas.

4.1 Seleção e caracterização dos materiais utilizados

4.1.1 Generalidades

De acordo com a norma NP EN447 [6], uma calda de injeção especial é uma mistura homogénea de cimento Portland (ligante), água, adjuvantes e adições.

4.1.2 Ligante

Como ligante, não seguindo a norma NP EN447 [6] elaborada no âmbito de caldas aplicadas em bainhas de pré-esforço, em vez de se utilizar o cimento Portland (CEM I 42,5R), optou-se por um cimento com características mecânicas inferiores, visto no presente trabalho não se ambicionarem resistências elevadas e sim otimização de custos. Para tal, utilizou-se o Cimento Portland de Calcário (CEM II/B-L 32,5N) (figura 4.1) [24]. A sua massa volúmica é 3040 Kg/m³ e finura específica de Blaine 461,7 m²/Kg. Nos quadros 4.1 e 4.2 serão expostas as características químicas, mecânicas e físicas, bem como a composição deste cimento.



Figura 4.1 - Cimento Portland (CEM II/B-L classe 32,5N)

Quadro 4.1 - Quadro com características químicas, mecânicas e físicas do cimento Portland (CEM II/B-L classe 32,5N) [51]

Características Químicas

Propriedades		Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfatos (em SO3)		NP EN 196-2	≤ 3,5%
Teor de Cloretos		NP EN 196-21	≤ 0,10%

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

Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
-	≥ 16	≥ 32,5 e ≤ 52,5	

Características Físicas

Propriedades		Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa		NP EN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade		NP EN 196-3	≤ 10 mm

Quadro 4.2- Composição do produto [51]

Clínquer Portland	65 a 79%
Calcário	21 a 35%
Outros Constituintes	0 a 5%

4.1.3 Adições

4.1.3.1 Fíler Calcário

O fíler calcário foi cedido pela empresa OMYA COMITAL - Minerais e Especialidades, S.A. e tem a designação comercial de Betocarb P1-OU. Esta adição apresenta-se na forma de pó (figura 4.2), sendo basicamente constituída por carbonato de cálcio oolítico. A sua massa volúmica é 2720 Kg/m³ e finura específica de Blaine 508,8 m²/Kg.

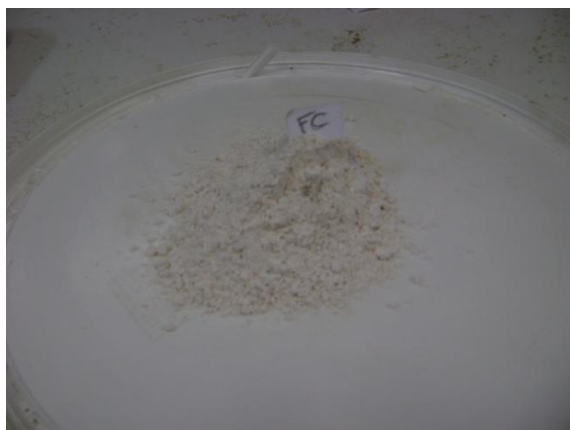


Figura 4.2 - Fíler calcário

De seguida serão apresentados dois quadros (quadros 4.3 e 4.4) com as características químicas e físicas do fíler calcário.

Quadro 4.3 - 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_2O_3)	< 0,22 %
Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	< 0,03 %
Insolúveis em HCl	< 0,04 %
Observação: Os resultados apresentados foram fornecidos pela empresa OMYA COMITAL.	

Quadro 4.4 - Características físicas do fíler calcário

Fíler 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.	

4.1.3.2 Pó de Vidro

O pó de vidro foi obtido da moagem de resíduos de vidro existente no laboratório de tecnologia e ensaios mecânicos da UBI (figura 4.3). Este material já apresentava uma granulometria semelhante à de uma areia, pelo que foi necessário moê-lo para se obter uma finura na ordem das dezenas de micras (inferior a $45\ \mu\text{m}$) de forma a considerar o pó de vidro um potencial substituto parcial do cimento. Os vidros são essencialmente constituídos por óxido de silício e, em menores percentagens, por óxidos de cálcio e sódio. A forma das partículas também foi analisada e constatou-se que a forma preponderante, que resulta do processo de moagem, é a laminar [52]. A sua massa volúmica é $2525\ \text{Kg/m}^3$ e finura específica de Blaine $443\ \text{m}^2/\text{Kg}$.

Para a obtenção da adição procedeu-se a moagem da “areia de vidro” num moinho de bolas (figura 4.3), usando-se esferas cerâmicas, neste foram realizadas sucessivas moagens com a duração de 4 horas, entre cada, o material foi peneirado pelas peneiras com abertura de malha $500\ \mu\text{m}$ e $45\ \mu\text{m}$. Os fragmentos retidos na peneira de $500\ \mu\text{m}$ foram colocados de parte, enquanto os passados foram introduzidos novamente no moinho para uma moagem de 4h e uma posterior peneiração (figura 4.3) com o peneiro de abertura $45\ \mu\text{m}$. Este último processo foi repetido no máximo três vezes, considerando-se desperdício o que não foi passado no peneiro mais fino. Após as três repetições, todo o processo foi novamente executado. Contudo, de forma a aumentar a eficiência da moagem, colocou-se num dos moinhos os resíduos moídos cujo diâmetro era superior a $500\ \mu\text{m}$. Todo o pó de vidro composto por partículas de diâmetro inferior a $45\ \mu\text{m}$ (figura 4.3) esteve apto a ser utilizado como adição.



(a)



(b)



(c)

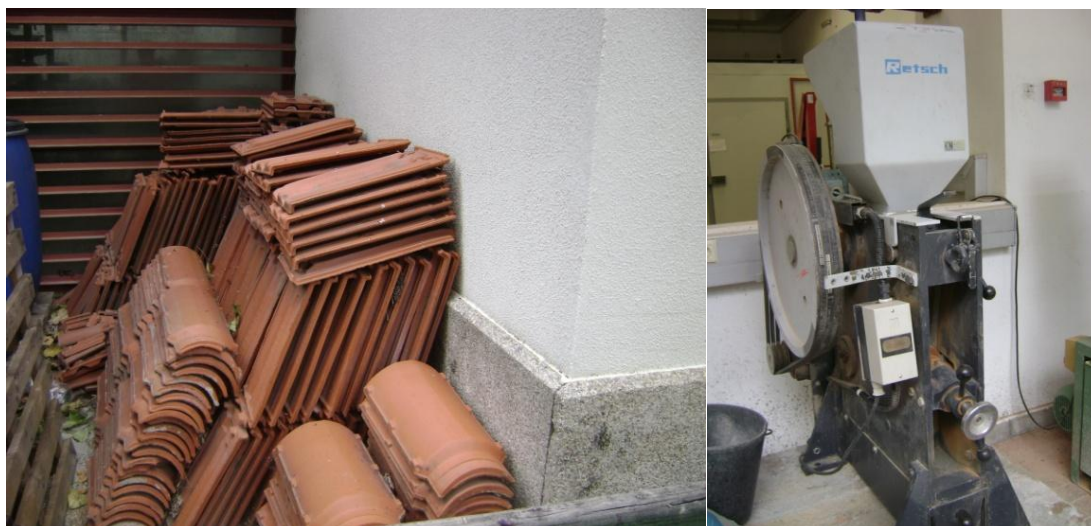
(d)

Figura 4.3 - Preparação do pó de vidro, (a) vidro moído; (b) vidro moído < 45 μm ; (c) moinho de bolas cerâmicas em funcionamento; (d) vidro a ser peneirado.

4.1.3.3 Pó cerâmico

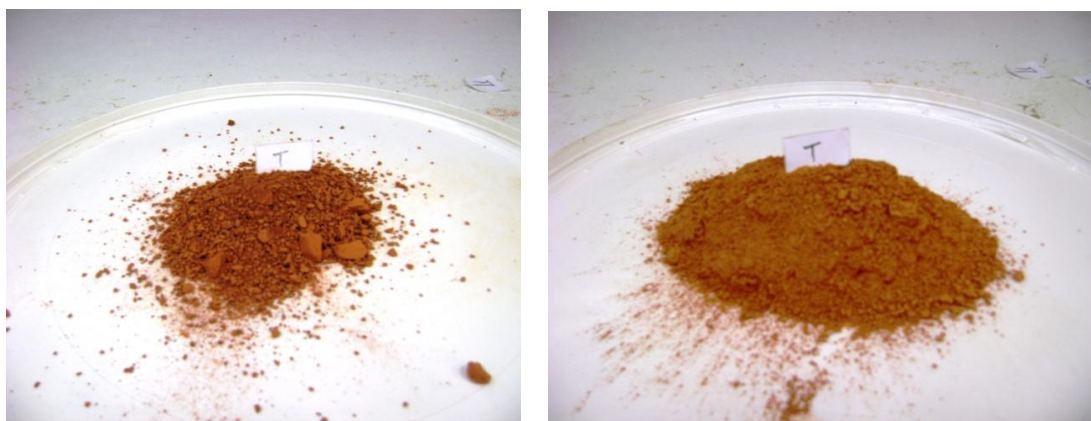
O pó cerâmico foi obtido da moagem de telhas cerâmicas vermelhas (figura 4.4) existentes no Laboratório de Tecnologia e Ensaios Mecânicos da UBI, até se atingirem diâmetros de partículas inferiores a 63 μm . A sua massa volúmica é 2660 Kg/m^3 e finura específica de Blaine 540 m^2/Kg .

Para a obtenção do pó, primeiramente as telhas foram partidas com o auxílio de um martelo em fragmentos com o máximo de 1 cm de diâmetro, de seguida estes foram triturados pelo britador de mandíbulas (figura 4.4). Neste processo de britagem foram executadas três repetições, onde o nível de finura aumenta sucessivamente até se atingir o máximo da máquina. O material resultante foi peneirado pelos peneiros de 500 e 63 μm de diâmetro. Os fragmentos retidos no peneiro de 500 μm foram novamente britados, enquanto os passados foram introduzidos no moinho de bolas cerâmicas (figura 4.4) e moídos durante 4h. Após a moagem, efetuou-se uma nova peneiração com a peneira de malha 63 μm de abertura. Todo o pó cerâmico composto por partículas de diâmetro inferior aos 63 μm esteve apto a ser utilizado como adição.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 4.4 - a) Telhas utilizadas no estudo; b) britador de mandíbulas; (c) Material cerâmico saído do britador de mandíbulas; (d) Pó cerâmico < 75 μm

4.1.3.4 Metacaulino

O metacaulino (figura 4.5) provém de um processo de calcinação da argila caulinitica a temperaturas entre os 500 e 800 °C e posterior moagem. A massa volúmica é 3186 Kg/m³ com coeficiente de variação 9,71% e finura específica de Blaine 899,5 m²/Kg.

Tabela 4.1 - Composição química do metacaulino [21]

Composição	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂
%	0,096	0,161	27	61,26	0,325	0,048	6,622	0,159	0,994



Figura 4.5 - Metacaulino

4.1.3.5 Biomassa

A biomassa utilizada foi fornecida ao Laboratório de Tecnologia e Ensaios Mecânicos da UBI pela empresa Celtejo (Vila Nova do Rodão), esta adição apresenta uma massa volúmica 2400 Kg/m³.



Figura 4.6 - Biomassa

4.1.4 Adjuvante

O superplastificante foi fornecido pela empresa Sika, com a designação comercial de Sika® ViscoCrete® 3005 [53]. Este adjuvante apresenta-se sob a forma líquida, de cor levemente amarelada e uma densidade de aproximadamente 1,05. Tem uma base química principalmente constituída por carboxilatos modificados. As suas principais características foram obtidas pela ficha técnica do produto.

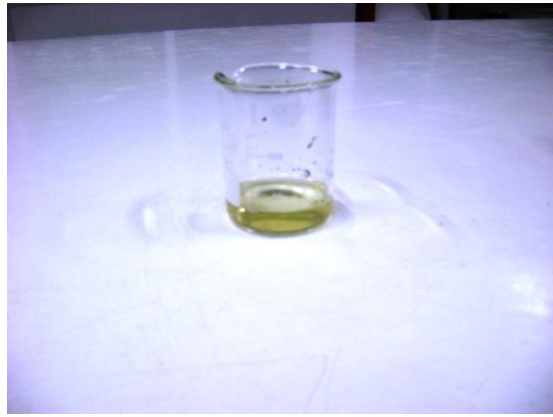


Figura 4.7 - Superplastificante Sika® ViscoCrete® 3005

4.1.5 Água de amassadura

No presente trabalho foi utilizada água potável da rede pública de abastecimento, inodora e sem gosto, conforme recomenda a especificação do LNEC E372 [43].

4.2 Preparação das caldas

4.2.1 Equipamento

No presente trabalho laboratorial, na preparação das caldas foi utilizado como equipamento de mistura mecânica, o misturador de pá. (figura 4.8), da marca ELE.



Figura 4.8 - Misturador e pá, respetivamente

A pesagem dos constituintes da calda foi efetuada numa balança digital (figura 4.9), com uma precisão de 0,1 g (figura 4.9).

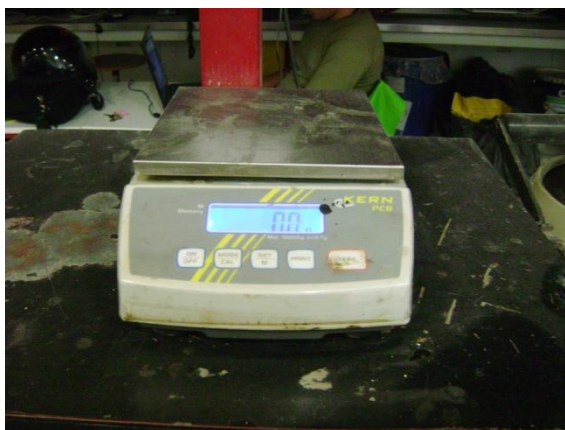


Figura 4.9 - Balança digital com precisão de 0,1 g

A quantidade de material utilizado na formulação das caldas em estudo é apresentada na Tabela 0.1 do Anexo A.

4.2.2 Protocolo de amassadura com um misturador mecânico.

As caldas foram produzidas com um equipamento de mistura (Figura 4.8) constituído por um recipiente em aço inoxidável fixado firmemente à armação do equipamento misturador, e por um misturador de pá também em aço inoxidável. A pá misturadora é acionada por um motor elétrico, com duas velocidades (lenta: 140 ± 5 rot/min; rápida: 285 ± 10 rot/min), num movimento de rotação sobre si mesma, acompanhado de um movimento planetário em torno do eixo do recipiente.

A preparação das caldas com este equipamento foi efetuada seguindo um protocolo baseado no procedimento de preparação da argamassa para avaliação dos requisitos mecânicos do cimento que se encontra descrito na norma NP EN 196-1:2006 [23], sem a adição da areia. Portanto a amassadura seguiu o seguinte procedimento:

1. Pesou-se cimento e adições (já dentro do recipiente onde se procede a amassadura);
2. Pesou-se água e superplastificante;
3. Colocou-se o recipiente com o cimento e adições no misturador;
4. Ligou-se o misturador na velocidade lenta (140 ± 5 rot/min);
5. Nos primeiros 30 segundos colocou-se gradualmente a água e o superplastificante no recipiente do misturador;
6. Misturou-se durante mais 60 segundos em velocidade lenta (140 ± 5 rot/min);
7. Parou-se o misturador durante 90 segundos. Nesta pausa, foi retirada a pasta acumulada nos bordos e fundo do recipiente com uma colher ou espátula, esta foi remisturada no meio do recipiente;
8. Por fim, misturou-se durante 60 segundos na velocidade rápida (285 ± 10 rot/min).

4.2.3 Moldagem de corpos de prova

Nos ensaios físicos realizados no estado endurecido, foram utilizados corpos de prova de forma prismática com dimensões de 40x40x160 mm³ (figura 4.10). Estes encontram-se em conjuntos de três moldes que são previamente limpos, isolados e lubrificados com óleo (figura 4.11). Os moldes foram preenchidos já na camara de cura (22°C ± 2°C e > 90% HR). Após 2 dias, os corpos de prova foram desmoldados. Acabada a tarefa, os moldes foram limpos e oleados para evitar corrosão dos mesmos.



Figura 4.10 - Exemplo de um corpo de prova



Figura 4.11 - Molde a ser lubrificado antes da introdução da calda

4.3 Ensaios realizados

Os ensaios realizados com caldas visaram a determinação-das suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido. O objetivo principal desta campanha de ensaios é a comparação de caldas com adições com uma calda referência de cimento. Embora, as caldas aqui estudadas tenham aplicação em meios completamente diferentes verificou-se também a conformidade às exigências apresentadas pela norma NP 447 [2], para caldas de injeção de bainhas de pré-esforço.

A partir da calda de referência, as demais caldas foram obtidas pela substituição de 50% de cimento por adições. Com a percentagem constante de superplastificante determinou-se a quantidade de água para que as caldas possuam fluidez semelhante. Isto é, todas as caldas devem apresentar um tempo de escoamento no cone de Marsh de 18±2 segundos. De acordo

com a literatura, considera-se que com este valor de fluidez as caldas possuam um escoamento normal.

4.3.1 Ensaios às caldas no estado fresco

No estado fresco realizaram-se ensaios de fluidez, consistência por espalhamento, exsudação, segregação, injetabilidade e também se efetuaram ensaios reológicos às caldas.

Estes têm como objetivo conferir, se as caldas possuem fluidez durante o tempo suficiente, capacidade de penetração uniforme e também ausência de segregações e exsudação mínima.

4.3.1.1 Determinação da Fluidez

Para realizar este ensaio estão consagrados na norma NP EN 445 [1] dois métodos alternativos, o método do cone (Marsh) e o de imersão. Contudo, no presente estudo optou-se pelo cone de Marsh.

Este ensaio teve como objetivo a determinação do tempo necessário, em segundos, para que se escoe um volume de 700 ml de calda através do orifício do cone com um diâmetro de 10 mm. Inicialmente foi introduzido 1 litro de calda no cone, sendo esta passada num peneiro de malha quadrada de abertura 1,5 mm (já existente no cone) [1]. Na figura 4.12 encontra-se representado o cone normalizado para este ensaio.



Figura 4.12 - Ensaio fluidez pelo cone de Marsh

O resultado do ensaio depende das condições de escoamento da mistura através do orifício do cone. A norma NP EN447 [6] especifica limites para os resultados dos ensaios de maneira a fluidez da calda seja suficientemente alta para permitir uma injeção eficaz e adequada por forma a encher totalmente o meio pretendido, mas suficiente baixa para expulsar todo o ar ou água que eventualmente ainda possa existir devido ao processo de preparação do meio para injeção. Estas normas [1,2], referem-se a bainhas de pré-esforço, mas na ausência de normalização na aplicação de caldas no intuito de consolidação, optou-se por realizar todas

as misturas com fluidez, imediatamente após a amassadura, de 18 ± 2 s, tempo este inferior aos 25 s referidos na norma NP EN447 [6].

4.3.1.2 Determinação do espalhamento (mini slump)

A fluidez da calda de consolidação foi também avaliada pelo ensaio de espalhamento segundo a NP EN445 (2008). O ensaio foi realizado logo após a mistura da calda. Começou-se por encher na totalidade o mini cone e de seguida este foi levantado na vertical, provocando o espalhamento da pasta (figura 4.13) que foi medido em duas direções perpendiculares, sendo o resultado a média das medições. Para o ensaio, a superfície deve de estar nivelada e lisa para que não haja qualquer influência no espalhamento. A superfície de suporte também deve ser limpa com um pano humedecido antes do início do ensaio.

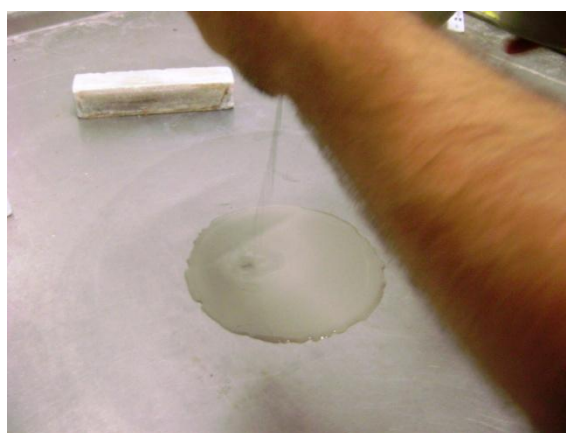


Figura 4.13 - Ensaio de espalhamento (mini slump)

4.3.1.3 Determinação da exsudação e segregação

O ensaio de exsudação consistiu em medir-se a quantidade de água que refluí à superfície de uma calda que foi deixada em repouso numa proveta durante 3 horas. Passadas as 3 horas mediu-se a quantidade de água à superfície da mistura (v_1) como ilustra a figura 4.14, sendo o resultado da exsudação expresso em percentagem do volume inicial de calda (v_0):

$$\text{Exsudação \%} = \frac{v_1}{v_0} \times 100 \quad (4.1)$$

A norma NP EN447 [6] especifica um resultado máximo de 2% no ensaio, evitando-se desta forma a sedimentação e segregação da calda. Na ausência de norma específica para caldas de consolidação de alvenarias, esta [6], que se destina a caldas de injeção para armaduras de pré-esforço, é utilizada neste estudo apenas como referência. Pois, parte-se do princípio que os meios de injeções são completamente distintos: um impermeável e outro poroso.

O ensaio de segregação aparente (em repouso) consiste na medição do extrato que se encontra na parte inferior da proveta, após esta ter estado em repouso durante 3 horas. Passado este tempo, mediu-se a quantidade total de calda (h) e da parte já sedimentada (h_1)

como ilustra a figura 4.14, sendo o resultado da sedimentação expresso em percentagem a partir da seguinte fórmula:

$$\text{Segregação \%} = \frac{h_1}{h} \times 100 \quad (4.2)$$



Figura 4.14 - Ensaio de exsudação

4.3.1.4 Determinação da massa volúmica

Os ensaios da massa volúmica de uma calda são realizados segundo a Norma Britânica BS EN 1015-06 [54]. Após a mistura estar concluída, introduziu-se um litro desta num recipiente cilíndrico previamente tarado e de seguida efetuou-se a pesagem, como ilustra a figura 4.15. O valor indicado na balança é a massa volúmica em g/dm^3 .

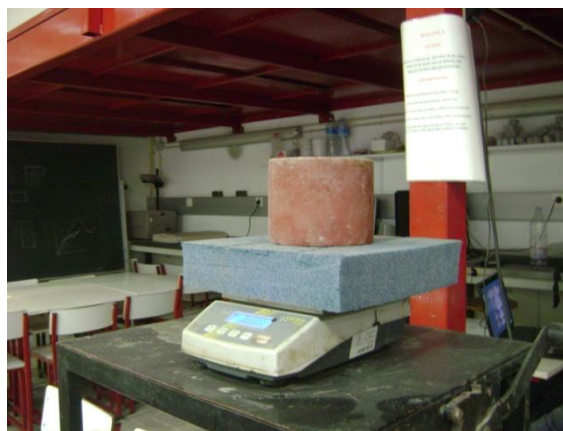


Figura 4.15 - Pesagem de 1 litro de calda

4.3.1.5 Determinação da injetabilidade na coluna de “areia”

O ensaio descrito na norma NF P 18-891 [55], consiste em injetar a calda a testar, sob pressão constante, num tubo de plástico ou acrílico transparente (coluna) cheia de areia calibrada, que se mantém na posição vertical. Neste trabalho utilizou-se uma coluna em acrílico e a areia calibrada foi substituída por esferas de chumbo com o diâmetro de 4,5 mm por serem mais práticas de usar e mais económicas, visto que a areia calibrada não pode ser reutilizada. Esta utilização foi já validada com ensaios comparativos em trabalhos anteriores efetuados por outros autores [56].

O esquema do ensaio pode ser visualizado na figura 4.16

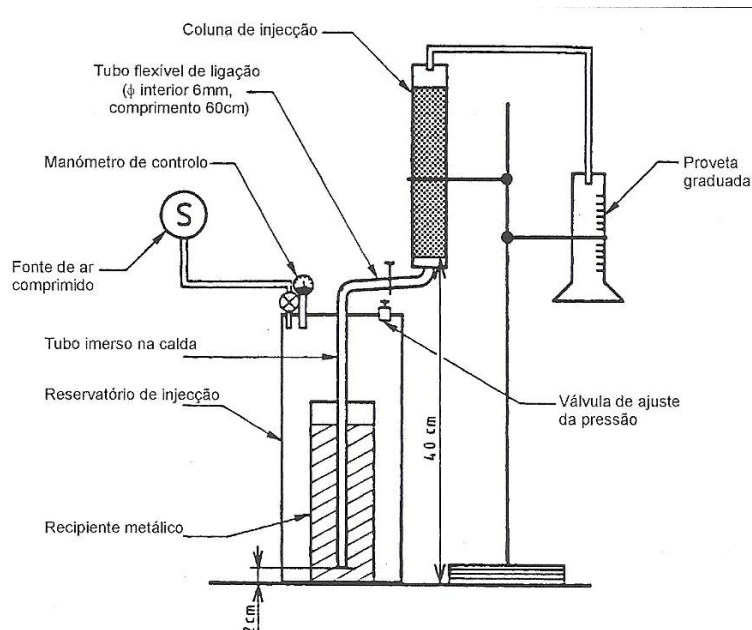


Figura 4.16 - Esquema do ensaio de injetabilidade na coluna de areia [56]

Neste ensaio, é medido o tempo (s) de enchimento da coluna como resultado principal, contudo também se procedeu a medição do caudal instalado (ml/s) após o enchimento da coluna.

O ensaio realizou-se de acordo com o esquema apresentado (figura 4.16) referido na norma NF P 18-891 [55], com alterações mínimas. De seguida é descrito o equipamento utilizado na realização do ensaio, este apresentado de jusante para montante:

- Fonte de ar comprimido (compressor elétrico).
- Válvula reguladora de pressão.
- Tubo flexível que liga a válvula à camara de pressão.
- Recipiente metálico inserido na camara de pressão com diâmetro interior 11,5 cm e altura 25 cm.

- Tubo metálico centrado com o recipiente onde será inserida a calda, ficando uma extremidade cerca de 2 cm do fundo do recipiente e a outra ligada à tampa da camara de pressão.
- Tubo flexível transparente, com diâmetro interior de 5 mm e comprimento 60 cm, que tem como função transportar a calda da camara à coluna de injeção.
- A coluna de injeção foi moldada a um tubo de acrílico transparente, com diâmetro interior 2,5 cm e 40 cm de comprimento. Este tubo foi fechado nas extremidades por rolhas de cortiça perfuradas para servirem de elo de ligação à coluna sendo nelas encaixadas as mangueiras/tubos flexíveis. No interior da coluna de injeção foram introduzidas esferas em chumbo $\Phi 4,5$ mm simulando um meio poroso (alteração prevista à NF P 18-891 [55]) numa extensão de 36 cm, onde se pretende diferenciar a facilidade de penetrabilidade de cada calda. Entre as extremidades da coluna foram colocadas redes metálicas dobradas de forma aproximadamente semiesférica a separar as esferas da entrada e saída da calda, sendo a rede de malha quadrada de abertura 1 mm, isto com o objetivo de se evitar o entupimento das extremidades interiores dos tubos junto à entrada e à saída da coluna.
- Tubo flexível transparente para condução da mistura da coluna ao recipiente que o recolhe.
- Por último teve-se uma proveta graduada para se poder quantificar o caudal em ml/s

a) Pressão de injeção

A pressão adotada foi de 1 kgf/cm^2 , sendo esta uma pressão correntemente utilizada em obra de acordo com estudos realizados por outros autores [2].

b) Procedimento do ensaio

No minuto final da amassadura verificou-se a existência da pressão de 1 kgf/cm^2 na saída de ar do compressor, que já estava ligado à tampa da camara de pressão.

Finalizada a mistura, a calda foi vertida no recipiente metálico já no interior da camara de pressão. De seguida colocou-se a tampa e fechou-se a saída da camara para a mangueira de condução do fluido ao meio poroso.

Devido à ausência de material adequado, isto é, uma válvula reguladora de pressão na camara de pressão para que todo ensaio fosse realizado a pressão constante, e tendo em conta que o objetivo deste estudo visa a diferenciação entre a facilidade de injetabilidade das diferentes misturas, e não com ensaios efetuados por outros autores. Ajustou-se um método, e todos os ensaios foram executados perante as mesmas condições para que posteriormente se pudessem tirar relações. Este método consistiu em abrir a entrada de ar na camara durante 30 segundos para que se iniciassem todos os ensaios com a mesma pressão e passado esse tempo

foi aberta a saída da câmara para coluna. O início da injeção deu-se quando a calda entrou na coluna, e o final quando esta chegou a uma meta situada a 2 cm do topo da coluna.

No seguimento, a calda foi conduzida à proveta graduada onde se deu o cálculo do caudal instalado. Este foi feito da seguinte forma, a cronometragem foi iniciada quando a mistura atingiu os 50 ml e terminou aos 150 ml.

Concluindo, os resultados obtidos através deste ensaio foram: o tempo de enchimento da coluna de esferas de aço, em segundos, e o caudal escoado de calda expresso em mililitros/segundo.

Verificam-se diferenças do ensaio de injetabilidade realizado relativamente ao ensaio normalizado [55], estas foram as seguintes:

- Uso de esferas de chumbo com diâmetro igual a 4,5 mm.
- A inexistência de pressão constante durante o ensaio, mas com variação idêntica em todos eles.
- Medição apenas do tempo de enchimento da coluna e não tempos referentes a enchimentos parciais.

4.3.1.6 Determinação das propriedades reológicas das caldas

Os ensaios de reologia foram realizados através de um reómetro para avaliar o comportamento reológico de caldas. Os reómetros são equipamentos que avaliam as propriedades reológicas de fluidos, caldas, suspensões, argamassas e betões. Determinam parâmetros como a viscosidade e tensão de cedência. Colocada à mistura velocidades angulares de corte, são obtidas as resistências oferecidas pelo material ao seu escoamento, que por sua vez está diretamente relacionada com a viscosidade das caldas [57].

O ensaio reológico foi realizado através de um reómetro VISKOMAT NT (figura 4.17), este possui grande precisão e também esforço de torção suficiente para ensaios de caldas. Para efetuar o ensaio colocou-se a calda num recipiente cilíndrico já no reómetro. Nisto é escolhido o perfil adequado, neste estudo foram utilizados dois perfis (figuras 4.18 e 4.19).



Figura 4.17 - Reómetro Viskomat nt

Após a escolha do perfil (figura 4.18) iniciou-se o ensaio, onde uma pá especial para caldas desceu ao fundo do recipiente entrando em contacto com a mistura. Seguidamente, a base onde o recipiente foi colocado entrou em rotação com a velocidade pretendida, esta com variações no decorrer do tempo. À medida que o copo roda, a resistência viscosa que a calda ofereceu ao fluxo através das lâminas da pá origina um esforço de torção que foi medido e registado eletronicamente ao longo de toda a duração do ensaio.

Para o perfil de velocidade em rampa (figura 4.18), a velocidade de rotação varia de 0 a 160 rpm em 1 min, mantendo-se 1 min a velocidade constante e por fim regressa a 0 rpm também em 1 min.

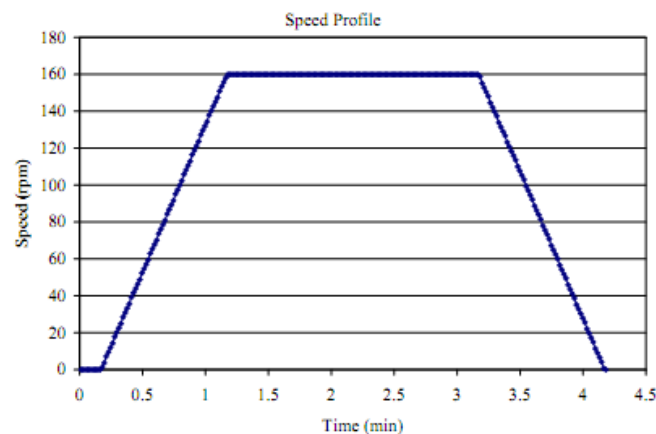


Figura 4.18 - Perfil velocidade em rampa [58]

Concluído o ensaio com o perfil apresentado (figura 4.18), deu-se início a um novo estudo, agora com um perfil de velocidade em patamares que demora 30 s de 0 a 160 rpm, mantendo a velocidade durante 15 min e volta a 0 rpm em 30 s. Este ensaio teve a duração 1h 1min, repetindo-se 4 vezes o processo referido, como ilustra a figura 4.19.

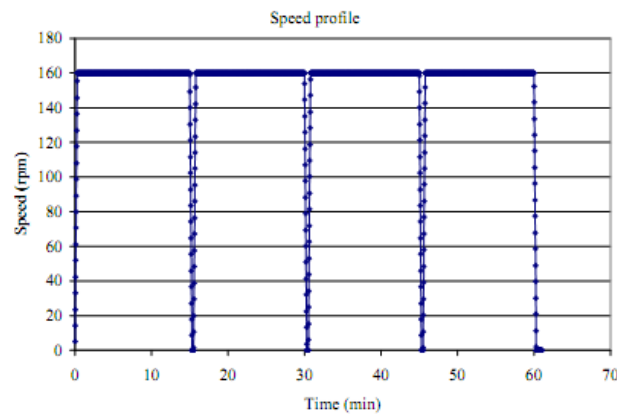


Figura 4.19 - Perfil de velocidade em patamar [58]

Estes perfis (figuras 4.18 e 4.19) possibilitam que se cheguem a valores de equilíbrio de torção para cada velocidade e construir assim curvas de fluxo para determinar os coeficientes relativos de viscosidade plástica e de tensão de cedência.

4.3.2 Ensaios no estado endurecido

No estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à flexão e compressão, módulo elasticidade dinâmico, capilaridade e retração livre. Em relação aos resultados, as caldas devem apresentar baixa retração e capilaridade, as suas características mecânicas devem de ser idênticas às dos materiais originais a consolidar ou ligeiramente superiores.

4.3.2.1 Determinação da resistência à flexão

Este ensaio foi realizado segundo a Norma Europeia EN 1015-11 [59]. Para a sua execução, um corpo de prova de 160x40x40mm foi colocado sobre os apoios que distam 10 cm entre si como ilustra a figura 20. Para que se inicie o ensaio foram introduzidos os dados necessários no programa da máquina de testes (ZWICK 1435), uma das principais informações inseridas foi a velocidade de aplicação da carga de 50 N/s, esta foi feita sem choque no centro do provete. O resultado do ensaio de flexão corresponde à força máxima registada pela máquina quando se deu a rutura do corpo de prova. Com a força de rutura calculou-se a resistência à tração por flexão das amostras segundo a formula 4.3. Este ensaio foi realizado aos 28 e 42 dias de cura das misturas.

$$f = \frac{1,5Fl}{bd^2} \quad (4.3)$$

Onde:

F- Força aplicada (N)

l - comprimento do vão (100 mm)

b - largura do provete (mm)

d - altura do provete (mm)

No cálculo, a tensão f resulta em N/mm²

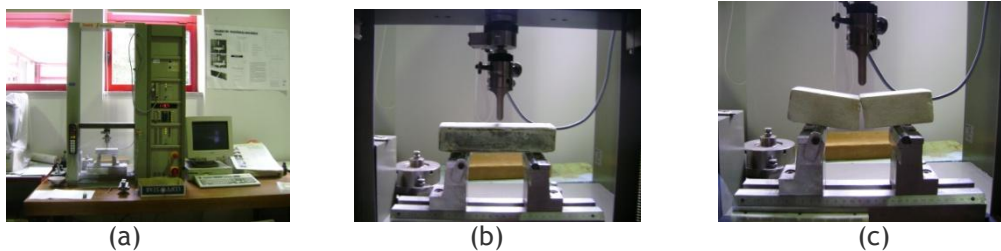


Figura 4.20 - Ensaio à flexão, (a) Máquina de ensaio; (b) corpo de prova a ser ensaiado, (c) corpo de prova já ensaiado

4.3.2.2 Determinação da resistência à compressão

O ensaio à compressão foi realizado com base na mesma norma do ensaio de resistência à flexão [59]. Neste, foram aproveitadas as metades dos provetes resultantes do ensaio referido anteriormente. Para a execução deste estudo, foi colocada a metade de um corpo de prova num aparelho especial para este tipo de ensaio (figura 21) com a atenção da face de enchimento estar na perpendicular ao plano de carga. A força foi aplicada sem choque até se dar a rutura do provete de 40x40x40 mm. O valor da resistência à compressão foi obtido através da média do valor das 6 metades ensaiadas de cada mistura. Este ensaio foi realizado aos 28 e aos 42 dias de idade.

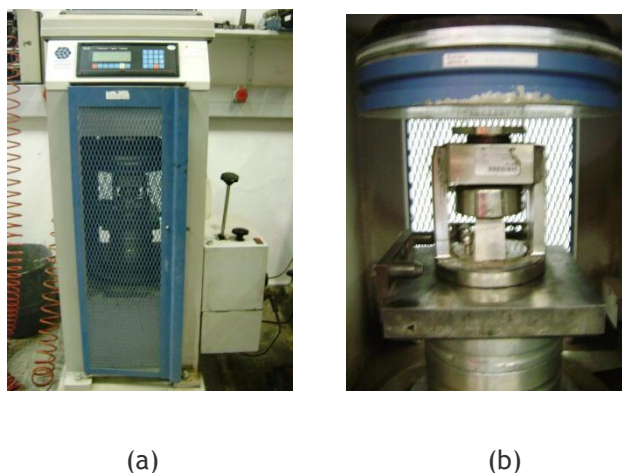


Figura 4.21 - Ensaio à compressão

4.3.2.3 Determinação da densidade aparente

Este ensaio foi realizado com base na Norma Europeia EN 1015-10 [60]. Concluídos os 28 dias de cura, os provetes foram colocados num forno a uma temperatura de $70 \pm 5^\circ\text{C}$ até que estes atingissem massa constante. Depois de esta ser atingida, foi registada a massa seca (figura 4.22) e no seguimento imergiram-se os provetes em água durante um dia para que estes ficassem saturados. Numa segunda fase, após a saturação dos provetes, estes foram pesados (massa saturada) (figura 4.22) e de modo a aplicar-se o princípio de Arquimedes para o cálculo do volume dos provetes, pesaram-se as suas massas imersas (figura 4.22), para tal, são colocados dentro de um cesto imerso em água. A densidade aparente (ρ) da calda foi

calculada através do quociente entre a massa do provete seco (m_1) e a diferença entre as massas saturadas (m_2) e imersas (m_3).

$$\rho = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \quad (4.4)$$



Figura 4.22 - Pesagem dos corpos de prova, (a) não imerso e (b) imerso

4.3.2.4 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Consegue-se calcular o módulo de elasticidade dinâmica a partir da velocidade de propagação de impulsos ultrassons utilizando-se um aparelho de medida da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (PUNDIT - “Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester”) (figura 4.23). Este indica o tempo do percurso de um sinal entre extremidades de um corpo de prova, este é medido em μseg .

A norma BS 1881 [61] apresenta uma equação que converte o módulo de elasticidade longitudinal proveniente da formula $v = (E/\rho)^{0,5}$, para o módulo de elasticidade do material (módulo de Young). (Equação 4.5)).

$$Ed = v^2 \times \rho \times \frac{(1+\mu) \times (1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (4.5)$$

Onde:

Ed- Modulo de elasticidade (MPa)

ρ - Densidade (Kg/m^3)

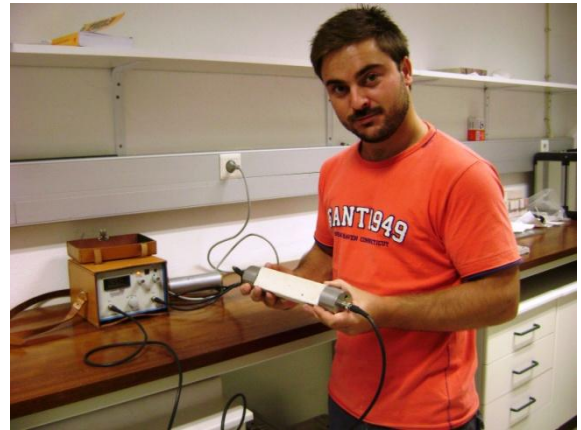
v- Velocidade de propagação (Km/s)

μ - Coeficiente de Poisson (aconselhado para este tipo de estudo 0,2)

Para se realizar o ensaio com rigor, foi necessário proceder-se a calibração da velocidade de propagação da onda num elemento com propriedades conhecidas (figura 4.23). Outro cuidado a ter para a execução do ensaio foi a preparação das extremidades das superfícies, estas devem de estar lisas e com uma ligeira camada de gordura (ex: vaselina) interposta entre a superfície e o transdutor para um melhor contacto. Os transdutores devem ser colocados em faces opostas e alinhados (figura 4.23). Este ensaio foi feito aos 28 dias de idade da calda.



(a)



(b)

Figura 4.23 - a) Calibração da velocidade de propagação da onda num elemento com propriedades conhecidas; b) Propagação do sinal num provete

4.3.2.5 Determinação do coeficiente de Capilaridade

A determinação do coeficiente de capilaridade foi realizada com base na Norma Europeia EN1015-18 [62]. Os corpos de prova foram inicialmente secos numa estufa ventilada a uma temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ até ser atingida massa constante. Os corpos de prova depois de retirados da estufa, foram deixados a arrefecer dentro de sacos de plástico, e posteriormente foram colocados num tabuleiro com água com a face resultante da rotura para baixo. Estes devem estar imersos durante o teste a uma profundidade de 5mm a 10mm. Depois de colocados no tabuleiro, este deve ser coberto para evitar a evaporação da água (figura 4.24). Antes de se colocarem os provetes no tabuleiro foi efetuada a pesagem da massa seca, e após os provetes em contato com a água foi medida a massa aos 10 e 90 minutos [62]. Procederam-se também leituras aos 30 e 60 minutos para um melhor acompanhamento da absorção de água por capilaridade. Os valores obtidos através da pesagem dos provetes foram expressos em gramas. No cálculo do coeficiente de capilaridade foram analisados 6 elementos para cada mistura.

Segundo a norma [62] o coeficiente de capilaridade (C) é calculado da seguinte forma (equação 4.6):

$$C = 0,1(M2 - M1) \quad (4.6)$$

Onde:

C- Coeficiente de capilaridade $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$

M2- Massa aos 90 min

M1- Massa aos 10 min



Figura 4.24 - Ensaio de capilaridade

4.3.2.6 Determinação da retração livre

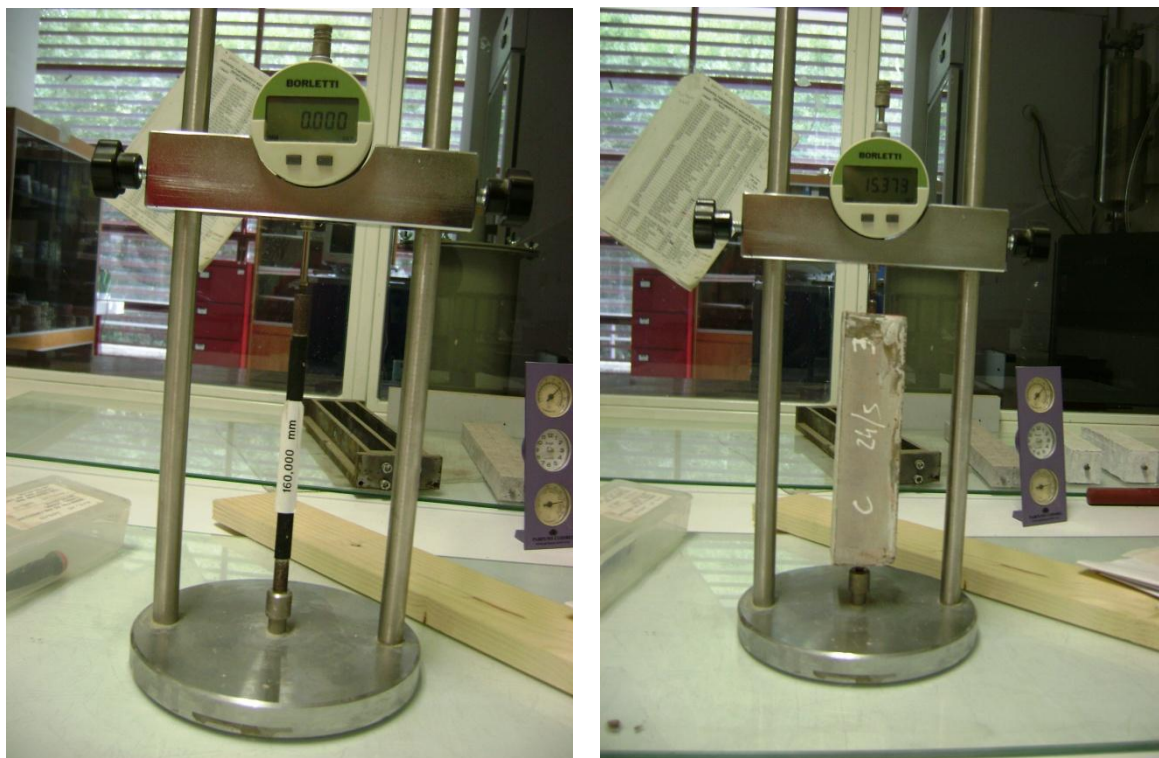
A determinação da retração livre teve como objetivo identificar a diferença entre o valor do comprimento de um corpo de prova após secagem, do seu valor inicial seguidamente à desmoldagem.

Para a realização deste ensaio os corpos de prova foram colocados numa sala de cura, a uma temperatura de aproximadamente $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $50 \pm 5\%$ durante os 28 dias, que corresponde à duração do ensaio.

Neste estudo, antes do enchimento dos moldes, foram colocados dois parafusos nas extremidades dos corpos de prova para que fosse possível calcular comprimento destes com máxima precisão (0,001 mm) através do micrómetro (figura 4.23), o comprimento considerado para efeitos de cálculo da retração foi a distância interna entre parafusos.

Para se efetuar as medições dos provetes foi necessário calibrar o micrómetro digital, colocando-se este a zero com o auxílio de uma barra de referência. Esta foi colocada sempre no mesmo sentido no procedimento da aferição conforme ilustra a figura 4.25. Este procedimento foi efetuado em cada série de medições realizada.

As medidas iniciais do comprimento (L_i) dos provetes foram realizadas com o cuidado de os colocar sempre da mesma forma, seguidamente anotaram-se 3 medições girando o corpo de prova sobre o seu eixo sempre no mesmo sentido, registando-se a menor. Esta rotação é fundamental, pois minimiza erros devido à excentricidade do provete. No final de cada leitura foi efetuada a pesagem de cada corpo de prova, para uma eventual relação entre a variação de massa e a retração.



(b)

Figura 4.25 - a) Calibragem do micrómetro digital; b) medição do provete

Para o cálculo da retração foi utilizada a seguinte expressão (equação 4.7):

$$L = \frac{L_{xi} - L_i}{G} \times 100 \quad (4.7)$$

Onde:

L_{xi} - leitura inicial do comprimento do corpo de prova (mm)

L_i - restantes leituras do comprimento, efetuadas de 7 em 7 dias (mm)

G- distância interna livre entre parafusos (mm)

Neste estudo teve-se o cuidado de desmoldar os corpos de prova após dois dias de cura, possibilitando que estes aumentem um pouco a resistência para que não se danifiquem com o momento torsor gerado nas extremidades ao desenroscarem-se as chapas dos parafusos (Figura 4.26)



(a)

(b)

Figura 4.26 - (a) Corpo de prova descofrado; (b) corpo de prova partido quando se desenroscava a chapa metálica

Capítulo 5

5 Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios submetidos às caldas no estado fresco e endurecido, de forma a verificar se estas asseguram as propriedades necessárias para serem utilizadas em consolidação de alvenaria de pedra pela técnica de injeção. No final do capítulo 2 encontra-se o quadro 4.2 que resume os requisitos necessários a garantir numa calda para injeção, dentro das quais, algumas não foram estudadas devido ao limite de tempo imposto para a elaboração da dissertação, estes estão identificados com um (*) no início de cada ponto. Seguidamente ao referido quadro, identificam-se as características de uma calda comercial que revelou proporcionar incrementos de resistência no estudo realizado por Rui Silva [2].

5.1 Propriedades das caldas no estado fresco

5.1.1 Condições iniciais para realização da atividade experimental

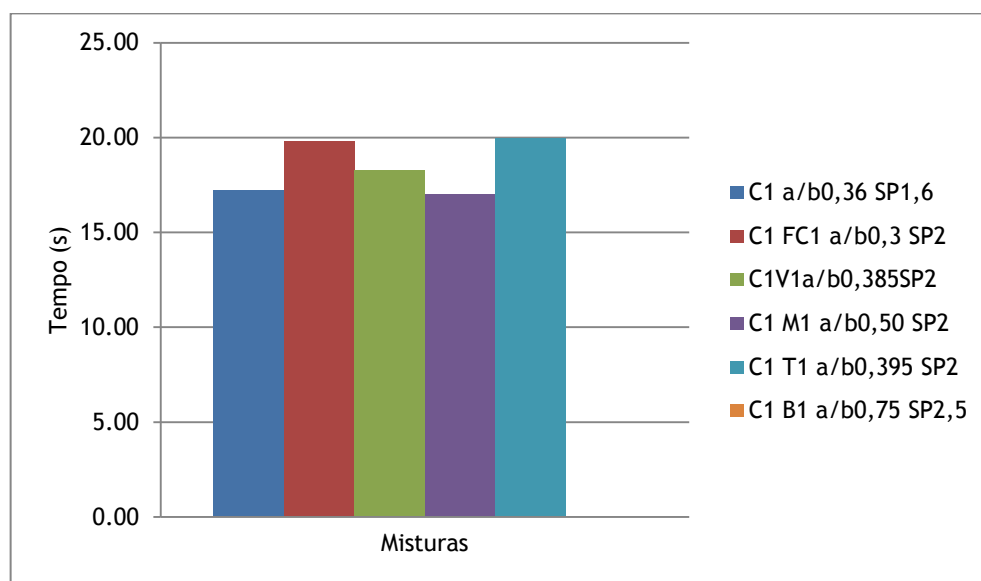


Figura 5.1 - Fluidez das caldas pelo ensaio do cone de Marsh 18 ± 2 s

Na preparação das caldas, respeitando-se a fluidez 18 ± 2 s, verifica-se (figura 5.1) que nas misturas com adições, a que possui metacaulino necessita de maior razão a/b (0,50) enquanto a composta por fíler calcário necessita de 0,30 a/b. As caldas com adição de vidro ou pó cerâmico necessitam aproximadamente da mesma quantidade de água para apresentarem fluidez semelhante (0,385 e 0,395 a/b, respetivamente).

A necessidade de água para dada fluidez, aumenta com a diminuição das partículas e aumento superfície específica das adições.

A adição de biomassa é excluída nesta primeira fase do trabalho laboratorial por dois motivos, o primeiro deve-se ao aparecimento de grumos formados durante a amassadura, estes dificultariam a passagem do fluido por obstáculos, e o segundo, deve-se à quantidade de água para que se atinja uma fluidez (aproximadamente o dobro das restantes misturas (figura 5.4)), que ainda assim não respeita os limites utilizados no estudo (apresenta um tempo de escoamento próximo de 40 s no cone de Marsh). Como é sabido, grandes percentagens de água prejudicam o comportamento de uma pasta, aumentando o risco de exsudação, aumento de permeabilidade tornando a calda mais suscetível a ataques químicos e também influencia o fenómeno de retração durante o endurecimento da pasta. Consideram-se estes motivos suficientes para abandonarmos o estudo do comportamento das caldas com esta adição.

Mini-Slump

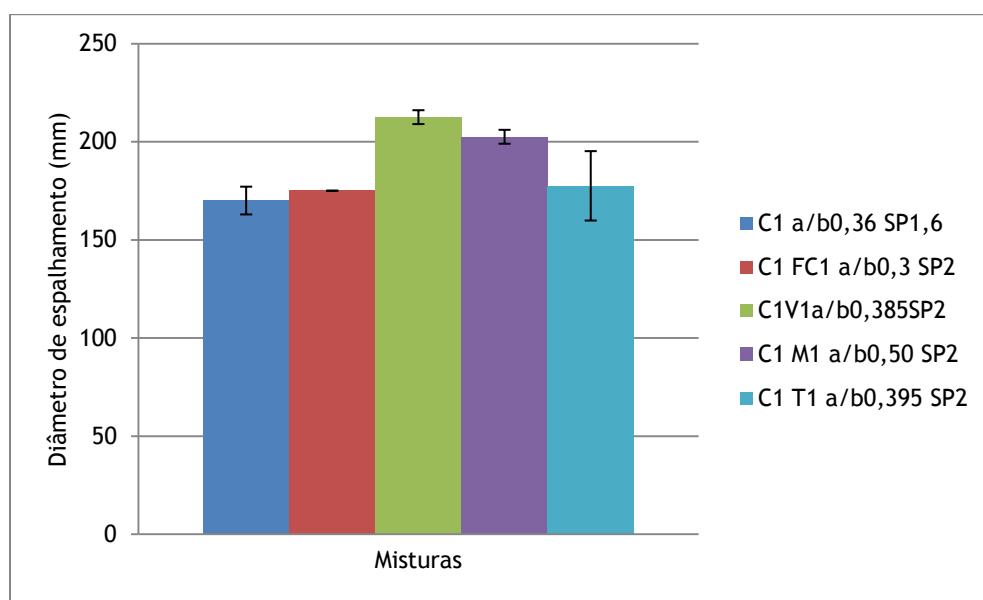


Figura 5.2 - Consistência por espalhamento pelo ensaio mini-slump

A figura 5.2 mostra que no ensaio de consistência por espalhamento evidenciam-se dois comportamentos, as caldas C, CFC e CT apresentam um espalhamento aproximado de 175 mm, enquanto as caldas CV e CM são as que possuem um espalhamento superior, que ronda os 200 mm.

No ensaio de fluidez pelo cone de Marsh (figura 5.1), ambicionou-se tempos idênticos de escoamento para todas as misturas, contudo, devido à dificuldade de acerto destas e à precisão inerente ao método de ensaio, admitiu-se um desvio de 2 segundos. Dentro desta

margem de erro destacaram-se duas caldas, a CFC e CT, por serem ligeiramente menos fluidas em relação às restantes.

Analisando a fluidez pelo cone de Marsh (figura 5.1) juntamente com o espalhamento do ensaio mini-slump (figura 5.2) são encontradas algumas coerências. É exemplo a mistura CFC, que é ligeiramente menos fluida, por sua vez tem baixo espalhamento, e a calda CM é das mais fluidas correspondendo a um elevado espalhamento.

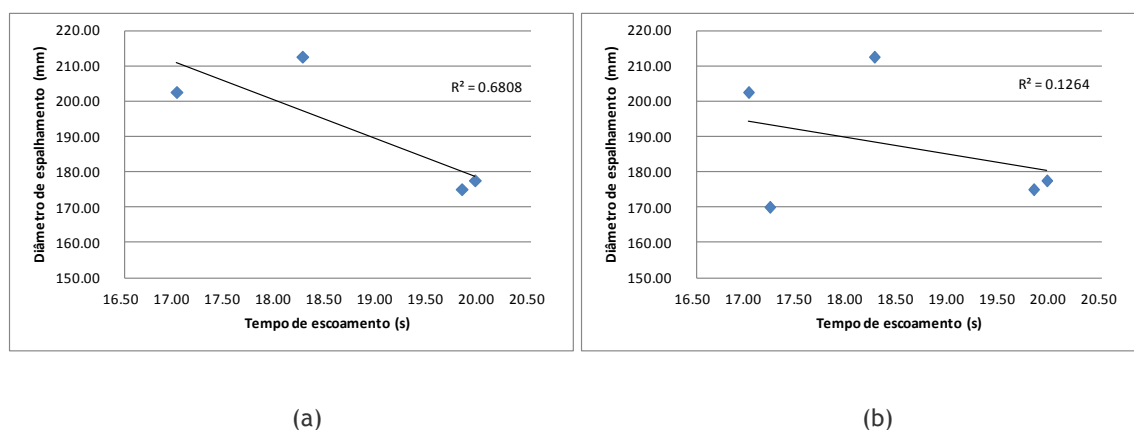


Figura 5.3 - Correlação entre o espalhamento e o tempo de escoamento, (a) sem calda C e (b) inclui a calda C

Na figura 5.3 (b) inclui-se os resultados obtidos com a calda de cimento. Esta, apesar de ser uma das mais fluidas o seu espalhamento é baixo em comparação com as restantes, supõe-se que tal acontecimento poderá estar relacionado com a viscosidade desta calda ser a mais elevada. Observa-se que este comportamento não segue a lógica das caldas com adições, pois a correlação entre os resultados de espalhamento e de fluidez não é estatisticamente significativa.

5.1.1.1 Relação água / materiais secos (a/b)

Uma calda quando na sua constituição possui adições, para alcançar uma determinada fluidez, necessita de maior ou menor quantidade de água consoante as características das adições. Na figura 5.4 identificam-se diferentes necessidades de água entre as misturas realizadas.

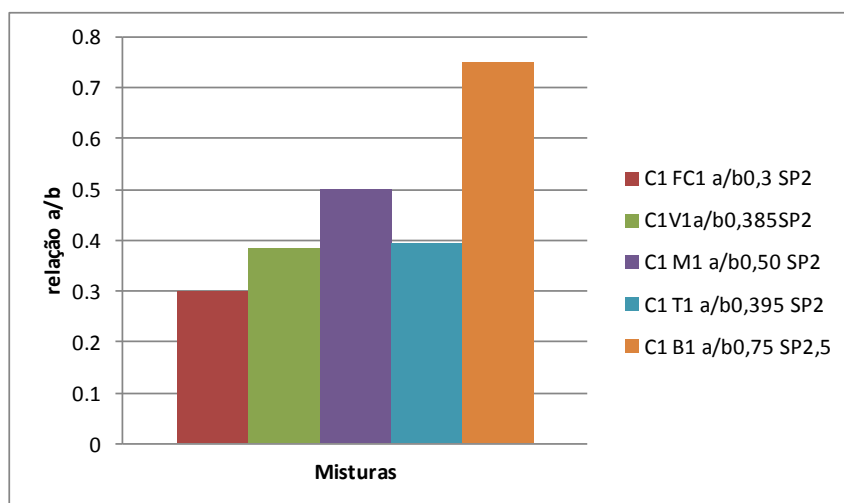


Figura 5.4 - Relações a/b necessárias para fluidez desejada

Analisando-se os resultados da figura apresentada conjuntamente com os da figura 5.1, observa-se que a calda CFC exige para a menor relação a/b para adquirir a fluidez desejada (18 ± 2 s). Não obstante, pode-se atribuir que esta menor relação seja a causa de uma fluidez próxima do limite superior deste intervalo.

Relacionando-se as diferentes misturas:

- As caldas CV e CT - Estas possuem aproximadamente a mesma razão água/materiais sólidos (a/b) (figura 5.5), no entanto, apesar da mistura CT ser ligeiramente mais fluida (figura 5.1), a mistura CV apresenta um espalhamento superior no ensaio de mini-slump. Supõe-se que este resultado possa estar relacionado com uma eventual diferença de viscosidades, em que a da mistura CV será menor.

- As caldas CFC e CT - Com menor relação a/b, a calda CFC possui fluidez e espalhamento idêntico à da mistura CT (figura 5.2), este facto deve-se à finura e superfície específica das partículas (S.E) do pó cerâmico serem mais elevadas.

- A calda CM - é a mistura que necessita de maior quantidade de água para que se atinja a fluidez pretendida (figura 5.4), que por sua vez corresponde a um elevado espalhamento (figura 5.2).

Efetuada-se uma análise geral, a calda com pó de vidro aparentemente confere uma baixa necessidade de água para se atingir determinada fluidez (figura 5.4), julga-se que este facto está relacionado com a morfologia do vidro, visto não ser a mistura com maior relação a/b e, no entanto é das mais fluidas, e com elevado espalhamento (figura 5.2).

Pelos motivos mencionados, elevada necessidade de água (figura 5.4) e aparecimento de grumos durante a amassadura, a calda CB foi abandonada do presente estudo prático.

5.1.2 Exsudação e segregação

Como ilustra a figura 5.5, a quantidade de água que reflui à superfície das caldas deixadas em repouso numa proveta durante 3 horas, é superior ao máximo aconselhado pela norma NP EN447 [2] para que se evitassem problemas com a segregação em repouso. Este problema verifica-se em todas as misturas com adições (figura 5.5).

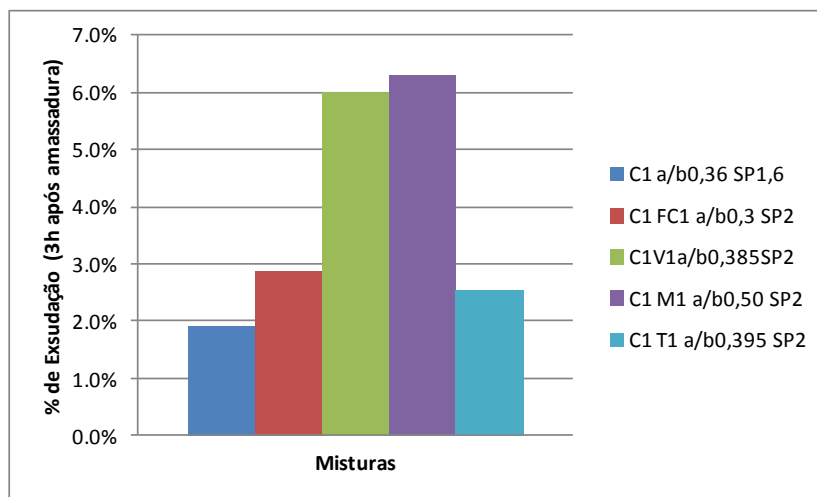


Figura 5.5 - % de exsudação após 3h da amassadura

Numa análise mais detalhada dos resultados da figura 5.5, verifica-se que tanto as caldas com adições de fíler calcário como pó cerâmico possuem percentagem de exsudação inferior a 3%. Enquanto as que possuem pó de vidro ou metacaulino, a primeira devido à impermeabilidade das suas partículas e a segunda devido à elevada quantidade de água, apresentam cerca de 6% de água a refluir na superfície do provete por exsudação.

O resultado de 6% de exsudação (figura 5.5), é 3 vezes superior ao máximo aconselhado pela norma NP447 [2], este valor, além de poder gerar problemas na consolidação pela eventual evaporação da água migrada para o topo dos poros provocando o aparecimento de alguns vazios, pode também condicionar a utilização das caldas CM e CV por eventuais níveis elevados de segregação. No entanto, a norma [2] que aconselha um máximo de 2% de exsudação, é utilizada para bainhas de pré-esforço e não para injeção num meio poroso, o que não faz deste valor um limite de exsudação para o caso de estudo. Lee [58], segundo E.-E. Toubakari, Van Gemert, & Tassios,(1999), refere que para caldas de injeção em meios porosos a exsudação não deve ser superior a 5% após 120 min. Esta informação pode tornar viável a utilização das misturas desenvolvidas, pois apenas duas delas ultrapassam este limite (figura 5.5). No entanto, o ensaio realizado durou mais 60 minutos do que o mencionado, tornando plausível se aceitarem os 6% de exsudação.

A ambição de produzir caldas económicas fez com que se utilizassem elevadas percentagens de substituição de cimento por adição (50%). Esta percentagem, como pode ser visualizado na

figura 5.6, induz altos níveis de segregação (em repouso) que por sua vez poderão provocar heterogeneidades nas características das pastas quando endurecidas.

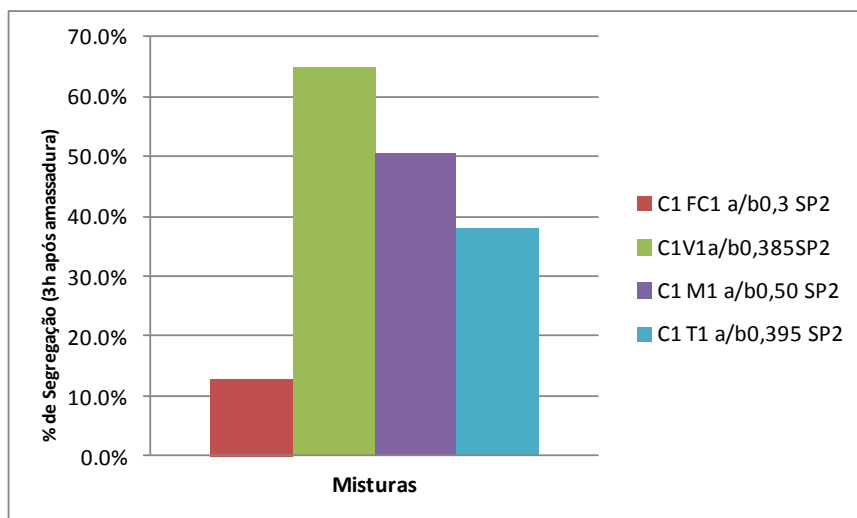


Figura 5.6 - % de segregação das caldas com adições após 3h de amassadura

Com os resultados obtidos na figura 5.6 comprova-se que percentagens mais elevadas de exsudação (Fig. 5.5) influenciam a sedimentação da mistura, visto serem novamente as misturas CV e CM a apresentarem maiores níveis de segregação aparente. Seguindo-se as caldas CT e CFC. No entanto, o valor da segregação para a calda CFC é inferior comparativamente à das restantes misturas, julga-se que este facto está associado à baixa relação a/b que minimiza o fenómeno de exsudação que por sua vez provoca menos alterações na suspensão.

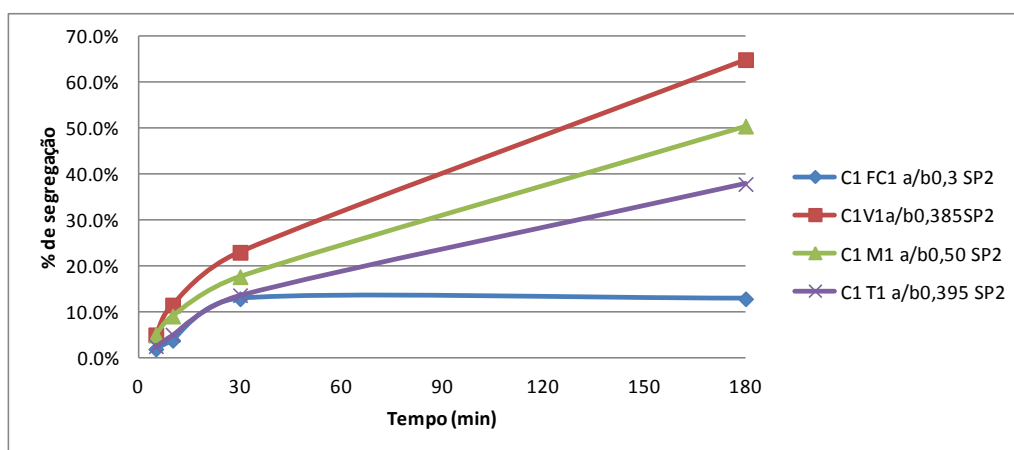


Figura 5.7 - % de segregação ao longo de 3h

O nível de segregação ao longo do tempo tende a aumentar em todas as misturas (figura 5.7), sendo este aumento idêntico nos primeiros 30 minutos nas caldas CFC e CM, contudo na calda CFC este estabiliza, enquanto a % de segregação da mistura CM continua a aumentar.

Na mistura CV os valores de segregação ultrapassam os 50 % (figura 5.7) que é a percentagem de adição utilizada. Este acontecimento justifica-se pelo facto de esta ser aparente, isto é, o extrato que se verifica na parte inferior do provete, além de cimento, contém partículas de adição que provocam o efeito fíler na mistura.

De forma a ilustrar as heterogeneidades provocadas pelo uso de grandes quantidades de adições em substituição parcial do cimento, segue-se o registo fotográfico de alguns provetes no estado endurecido onde podem ser observadas duas fases, a superior é essencialmente composta por adição, e a inferior possui maior percentagem de cimento (figura 5.8).

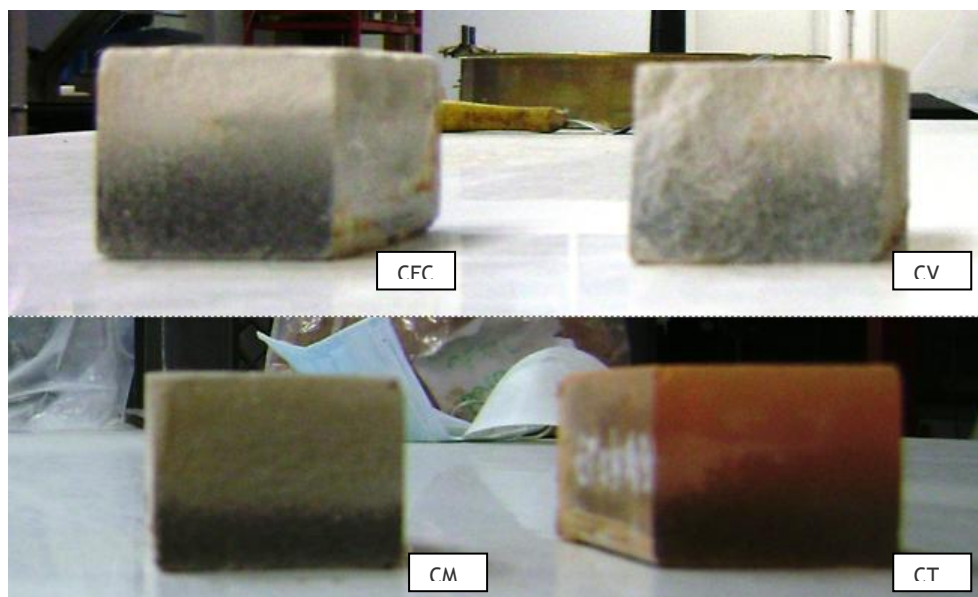


Figura 5.8 - Concentração de cimento na face inferior dos corpos de prova

A figura 5.9 mostra a % de sedimentação existente nos corpos de prova quando estes são endurecidos em moldes impermeáveis.

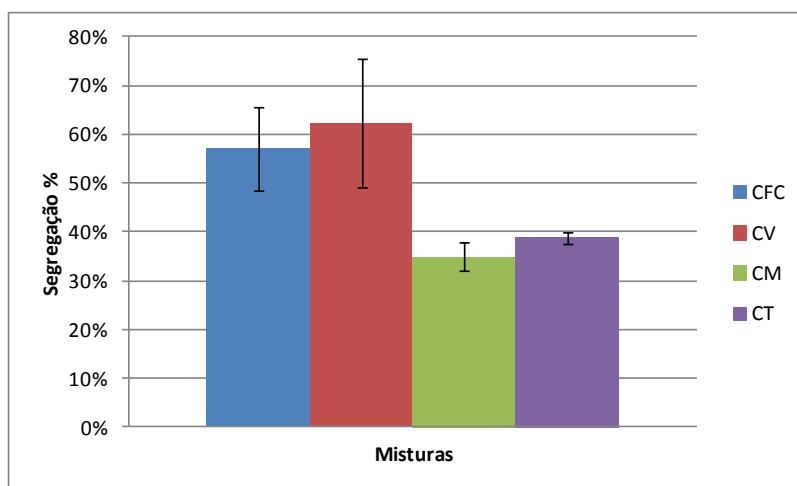


Figura 5.9 - Efeito da segregação no estado endurecido

No entanto, a segregação observada (figura 5.9) pode ser comprometedora, ou não, por consequência da sedimentação dos materiais no meio impermeável. No caso de estudo, que se ambiciona a injeção das caldas num meio poroso, as possibilidades de ocorrerem problemas com a sedimentação destas quando aplicadas logo após a mistura são diminuídas, pois parte da água da mistura é absorvida pelo suporte.

Este acontecimento merece um estudo mais adequado, em que se aconselha a consolidação de alguns modelos de paredes de alvenaria com as caldas desenvolvidas de forma a verificar como ocorre e o quão gravoso pode ser o fenómeno em discussão para cada uma das misturas.

5.1.3 Massa Volúmica

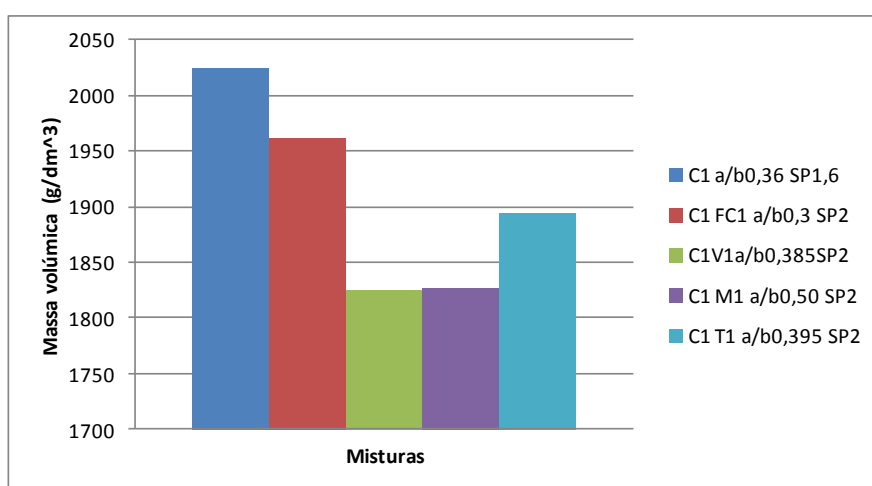


Figura 5.10 - Massa volúmica

Numa análise superficial dos resultados da figura 5.10, confere-se que a calda C é a que possui maior massa volúmica e as caldas CV e CM apresentam valores idênticos e por sua vez são os mais baixos, situando-se numa posição intermedia de massa volúmica as misturas CFC e CT, sendo a do CFC consideravelmente superior.

Esta diversidade de valores deve-se às diferentes massas volúmicas das adições, bem como à relação a/b utilizada para que se atingisse fluidez semelhante em todas as misturas.

5.1.4 Modelo e parâmetros reológicos das caldas de injeção

O comportamento reológico das caldas em estudo ajusta-se ao modelo de Herschel-Bulkley, neste existe tensão de cedência relativa e a viscosidade plástica relativa sofre alterações com a velocidade de corte. Este estudo indica que as caldas em análise são consideradas fluidos dilatantes, onde a viscosidade relativa aumenta com a velocidade de corte como pode ser visualizado no anexo B.

Equação de Herschel-Bulkley: (figura 5.11)

$$\tau = \tau_y + \eta \cdot \dot{\gamma}^n$$

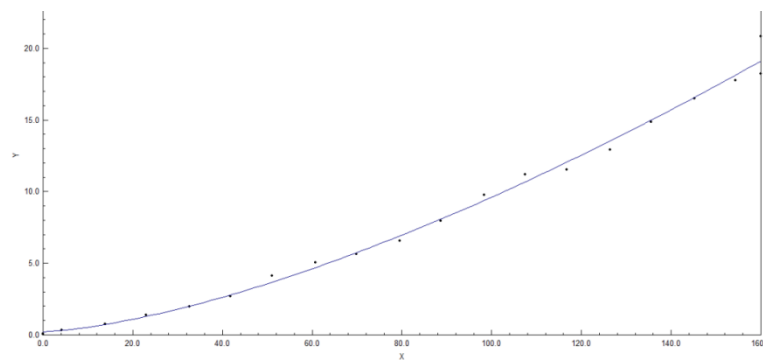


Figura 5.11 - Exemplo de resultado da equação Herschel-Bulkley

Os resultados para cada parâmetro da equação estão tabelados no anexo B, onde:

$$Y = \tau; a = \tau_y; b = \eta; X = \dot{\gamma}; c = n$$

5.1.4.1 Análise dos resultados obtidos com perfil de velocidade em patamar

a) Variação de tensão de cedência

Com o gráfico (figura 5.12) pretende-se mostrar como varia a tensão de cedência de cada calda ao longo do tempo.

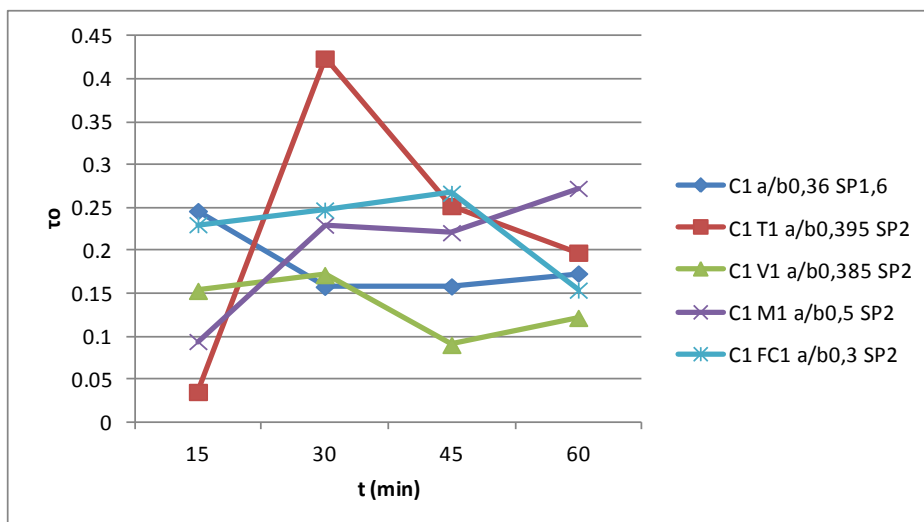


Figura 5.12 - Variação da tensão de cedência no decorrer do ensaio

Antes dos resultados serem discutidos, é efetuada uma análise gráfica de cada mistura (figura 5.12):

- A calda CM - A tensão de cedência tem sucessivos aumentos ao longo do tempo, aumento este aparentemente linear. Concluído o ensaio, em comparação com as outras misturas, esta é a que possui tensão de cedência superior.

- A calda C - Apresenta um decréscimo de tensão de cedência nos primeiros 15 minutos de ensaio, e seguidamente esta muda de comportamento, mantendo-se aproximadamente constante até ao final do ensaio.

- A calda CFC - Durante os primeiros 45 minutos de ensaio, a tensão de cedência permanece constante, sendo esta reduzida, cerca de 40%, nos seguintes 15 minutos.

- A calda CT - Começa por ter um aumento acentuado de tensão de cedência, e na última meia hora de ensaio, esta decresce significativamente, cerca de 50%.

- A calda CV - A tensão de cedência tem ligeiros decréscimos no decorrer do tempo. Numa análise global, esta é a mistura com tensão de cedência mais baixa.

Numa análise global:

- A calda CV apresenta tensões de cedência inferiores ao longo do tempo.

- A calda CM tem aumentos sucessivos de tensão de cedência, acabando por ser de todas as misturas, a que termina o ensaio a oferecer maior resistência.

- As caldas C e CFC começam por ter aproximadamente a mesma tensão de cedência, contudo, no decorrer do ensaio apresentam comportamentos distintos, na calda C esta desce

enquanto na mistura CFC sobe ligeiramente, no entanto na última fase do ensaio esta desce, fazendo com que terminem ambas as caldas com tensões de cedência aproximadas.

- A calda CT, apesar do súbito aumento de tensão de cedência, esta termina o ensaio com esta tensão na mesma ordem de grandeza das caldas C e CFC.

b) Variação do índice de viscosidade plástica relativa

A figura 6.13 ilustra como varia o índice de viscosidade plástica relativa das caldas ao longo do ensaio.

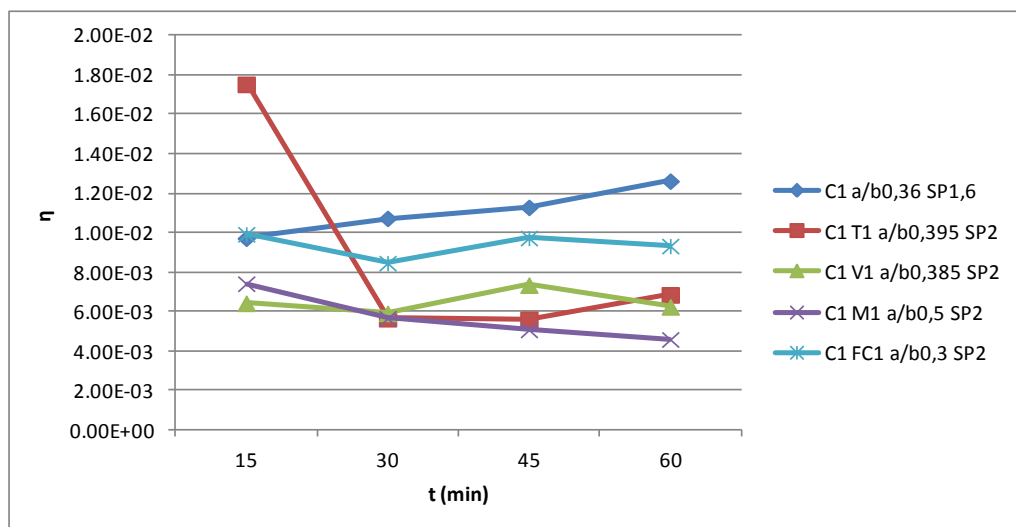


Figura 5.13 - Variação do índice de viscosidade plástica relativa no decorrer do ensaio

Efetuada-se uma análise individual figura 5.13:

- A calda CM - Tem uma ligeira redução de viscosidade aparentemente linear;
- A calda C - Tem um ligeiro aumento de viscosidade ao longo do tempo;
- A calda CFC - Mantém a viscosidade no decorrer do ensaio;
- Na calda CT - Tal como sucedido na avaliação da tensão de cedência nos primeiros 30 minutos, a viscosidade também apresenta grande variação, contudo, desta vez decresce e na continuação do ensaio permanece aproximadamente constante;
- Na calda CV - A viscosidade permanece constante;
- A calda CB - tem um decréscimo acentuado de viscosidade na primeira metade do ensaio, continuando sem variações significativas até ao final deste.

Numa análise global:

- Após 30 minutos de ensaio verifica-se (figura 5.13) que os índices de viscosidade plástica relativa se distribuem por três patamares, as caldas que possuem viscosidade inferior são as que possuem adições de vidro, metacaulino e pó cerâmico. As caldas C e CFC são as que possuem viscosidades mais elevadas, sendo a do C superior. Estes resultados devem-se essencialmente à relação a/b utilizada.

c) Dilatância

O comportamento reoespessante de cada calda varia no decorrer do ensaio da forma como a figura 5.14 ilustra.

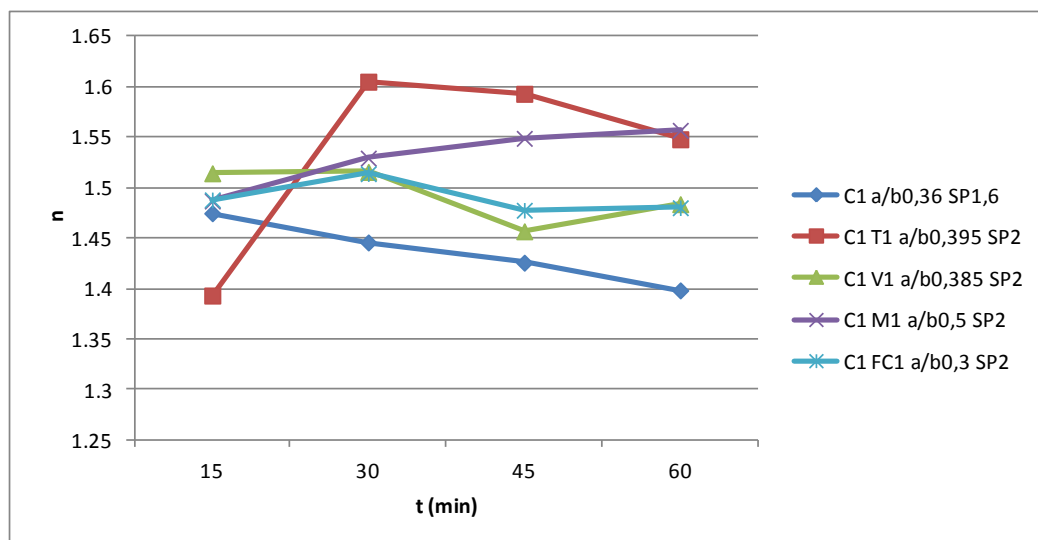


Figura 5.14 - Dilatância ao longo do tempo

- Numa análise geral, todas as caldas apresentam um comportamento reoespessante ($n > 1$), sendo as misturas CT e CM as que possuem maior dilatância (fig 5.14). Este facto talvez esteja relacionado por ambas possuírem estrutura de natureza argilosa. A calda CM tem um comportamento crescente de forma aproximadamente linear ao longo de todo o ensaio, enquanto a calda CT aumenta a sua capacidade reoespessante de forma expressiva (cerca de 15%) na primeira metade do ensaio, no entanto, as características dilatantes de ambos aproximam-se no final deste.

- As caldas CFC e CV além de serem fluidos reoespessantes, estas apresentam um comportamento idêntico ao longo do tempo (figura 5.14), onde a capacidade reoespessante diminui ligeiramente ao longo de todo o ensaio.

- A capacidade reoespessante da calda C também diminui no decorrer do ensaio mas de forma um pouco mais acentuada (5%) em relação às misturas CFC e CV (figura 5.16), revelando ser a calda com menos tendência reoespessante.

5.1.4.2 Análise dos resultados obtidos com perfil de velocidade rampa

Os resultados da tensão de cedência, viscosidade plástica relativa e dilatância para o perfil “rampa” estão tabelados no anexo B, contudo, de seguida estes serão apresentados graficamente para que sejam melhor compreendidas as diferenças entre misturas.

a) Tensão de cedência

A figura 5.15 evidencia dois grupos de caldas para valores de tensão de cedência. Sendo as constituídas por adições com características pozolânicas as que apresentam menor magnitude.

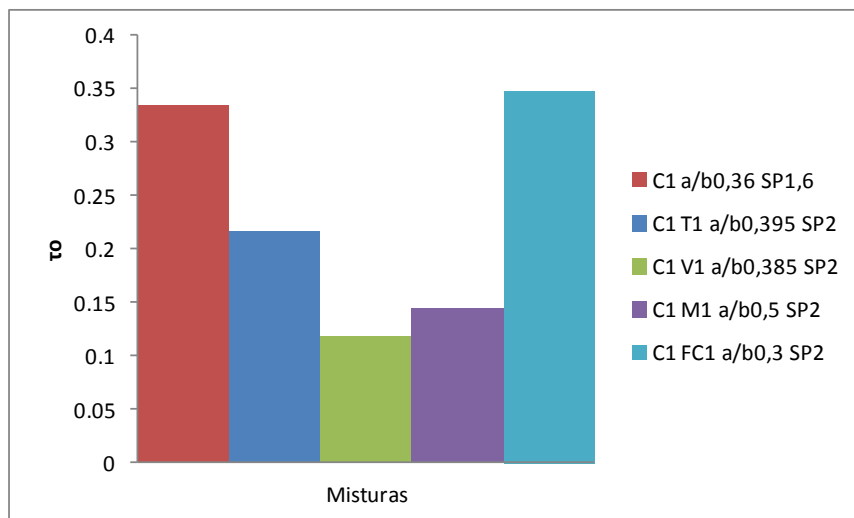


Figura 5.15 - Tensão de cedência de cada calda

Relativamente à tensão de cedência apresentada na figura 5.15, afere-se que as caldas C e CFC destacam-se por apresentarem aproximadamente o dobro da média das tensões de cedência das restantes misturas, enquanto as caldas CV e CM se evidenciam pelos motivos opostos, estas possuem tensões de cedência mais baixas, sendo a da calda CM ligeiramente superior à da mistura CV. Numa posição intermédia de tensão de cedência está a mistura CT.

Esta diferença de comportamentos deve-se sobretudo à relação a/b e à forma das partículas.

b) Viscosidade plástica relativa

Os resultados apresentados da viscosidade plástica relativa (figura 5.16) são parâmetros importantíssimos. Estes confirmam as suposições mencionadas no ensaio de consistência por espalhamento (figura 5.2), onde se indicaram possíveis motivos para a variação de espalhamento baseados na viscosidade plástica relativa das misturas.

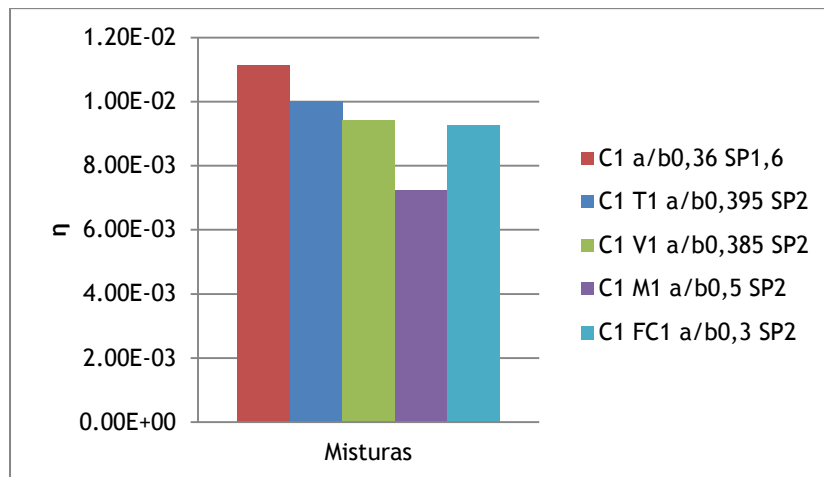


Figura 5.16 - Viscosidade plástica relativa de cada calda

Da análise gráfica da figura 5.16, verifica-se que:

- A calda C é a que tem valores de viscosidade superior;
- As caldas CT, CV e CFC possuem aproximadamente a mesma viscosidade, sendo a do CT ligeiramente superior;
- A calda CM é a que apresenta uma viscosidade mais baixa.

Com estes resultados, confirma-se que o uso de adições (50% de substituição do cimento) e o aumento da água na amassadura diminuem a viscosidade plástica relativa das caldas.

c) Dilatância

As caldas em estudo mostram ter um comportamento dilatante, evidenciando-se dois grupos com capacidades reoespessantes distintas, como ilustra a figura 5.17

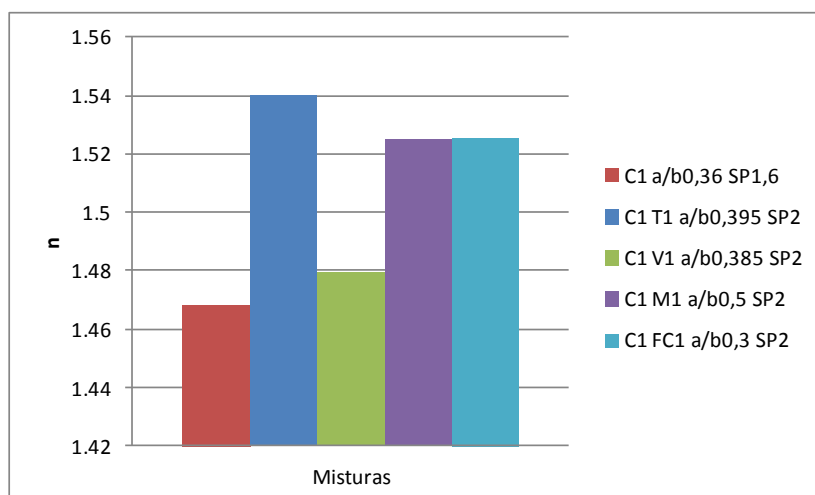
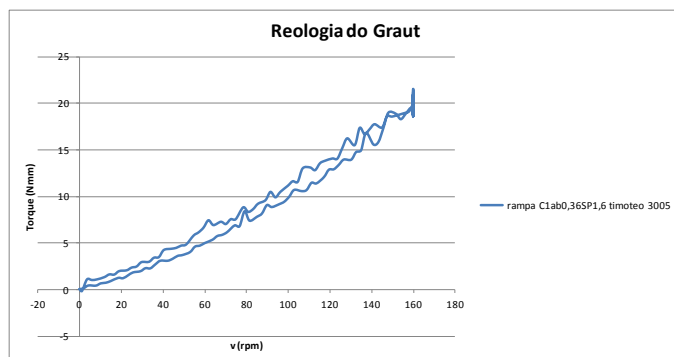


Figura 5.17 - Dilatância

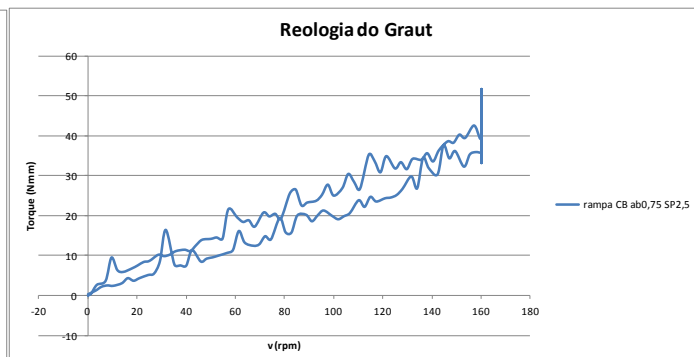
Da análise dos resultados da figura 5.17 afere-se que as misturas C e CV apresentam com distinção menor capacidade reoessante comparativamente às outras, e a calda CT é a que possui maior dilatância, seguindo-se com dilatâncias idênticas as misturas CM e CFC.

A calda com pó cerâmico é a que apresenta maior capacidade reoessante eventualmente pela saída da água existente entre a estrutura de placas durante a mistura

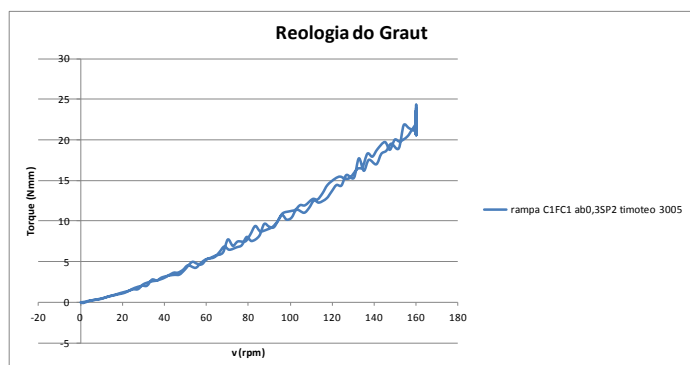
5.1.4.3 Verificação de existência de tixotropia



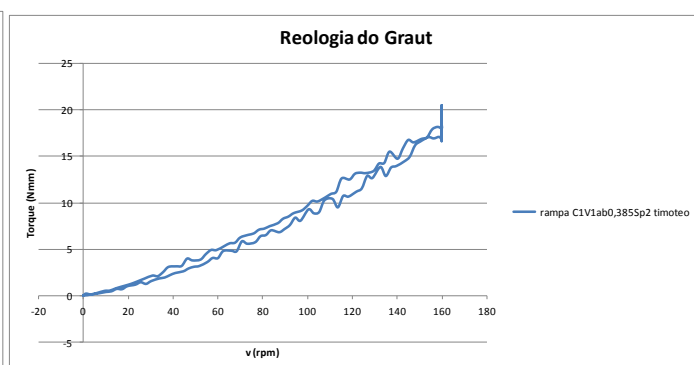
(a)



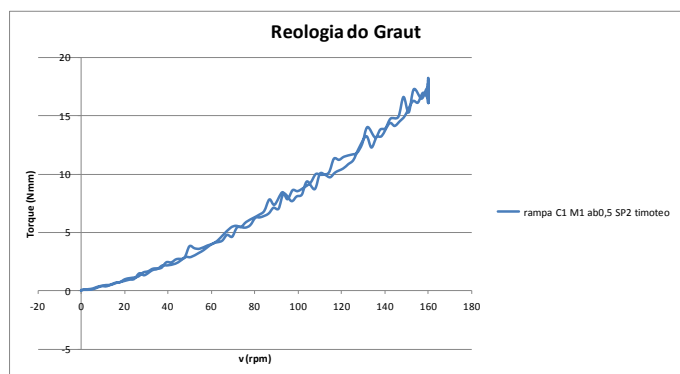
(b)



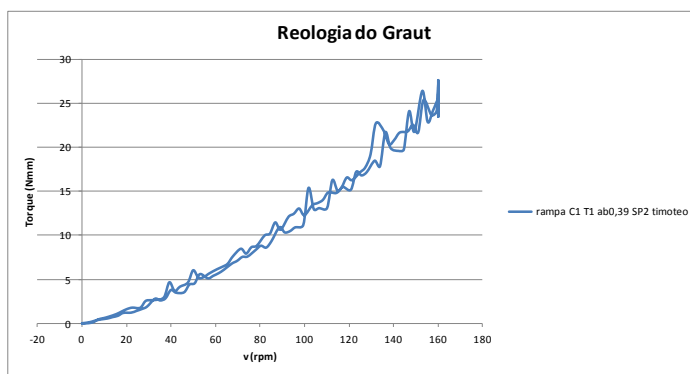
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.18 - Gráficos para verificação da existência de tixotropia. (a) calda C, (b) calda CB, (c) calda CFC, (d) calda CV, (e) calda CM, (f) calda CT

Nos gráficos apresentados na figura 5.18 pode observar-se que as partes, ascendente e descendente das curvas de corte das misturas C, CV e CB não coincidem, formando uma área de histerese entre elas, o que comprova o comportamento tixotrópico dessas caldas. No entanto, a referida área é menor nas misturas (CFC, CM e CT).

5.1.5 Injetabilidade

No presente trabalho laboratorial efetuam-se ensaios de injetabilidade das diferentes caldas num meio poroso, para que possam ser tiradas elações acerca de qual ou quais são as misturas que conferem melhor penetrabilidade. Este estudo é realizado porque se ambiciona que as caldas sejam injetadas posteriormente para efeitos de consolidação.

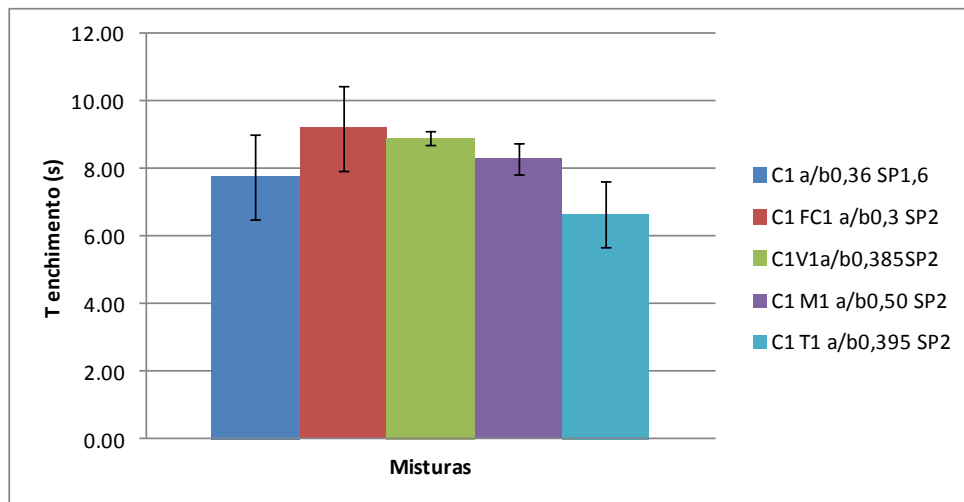


Figura 5.19 - Penetrabilidade das caldas

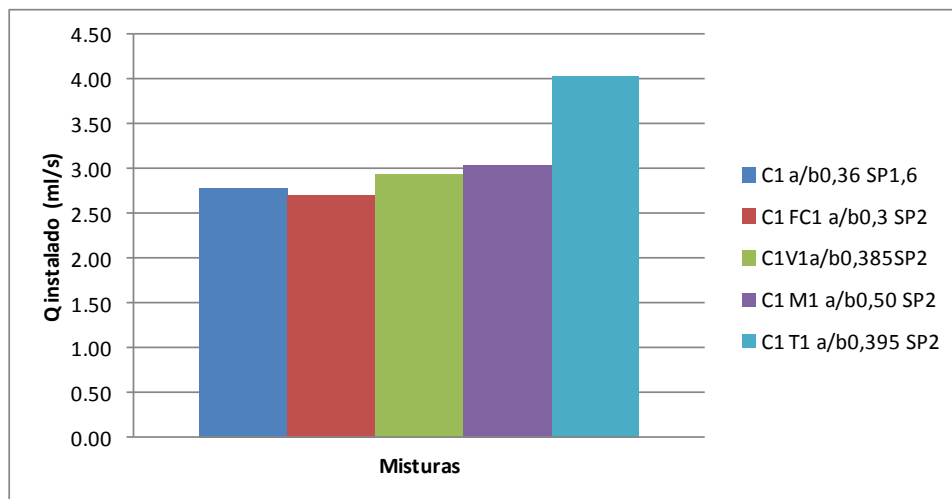


Figura 5.20 - Caudal instalado (ml / s)

Após a análise dos resultados da figura 5.19 verificam-se três patamares de injetabilidade, em que a mistura CT apresenta melhor capacidade de penetrabilidade, seguindo-se a calda sem adições e as restantes (CFC, CV e CM) são as que necessitam de mais tempo para preencherem na totalidade os vazios do meio poroso.

Devido à natureza do ensaio, a dificuldade de se atingir precisão nos resultados é elevada, pelo que se deviam realizar maior número de repetições para que o desvio padrão de cada mistura fosse minimizado. Este desvio, na calda CFC (figura 5.19) leva a crer que esta é a mistura com menos capacidade penetrante.

O caudal instalado (figura 5.20) está coerente com o grau de penetrabilidade de cada mistura.

Este ensaio contrariou as expectativas, por surpresa a mistura que apresenta maior capacidade penetrante é a CT e pensava-se que seriam as caldas CM ou CV a possuírem maior facilidade de injeção por serem as mais fluidos e menos viscosas. O motivo de estes não o

serem, presume-se estar relacionado com o facto de serem injetados sob pressão, que por consequência pode levar a que pequena parte da água seja expulsa das misturas provocando perdas de fluidez e aumento de viscosidade que por sua vez reduzirá capacidade penetrante das misturas.

5.2 Propriedades das caldas no estado endurecido

5.2.1 Resistência

5.2.1.1 Resistência à flexão

As caldas quando ensaiadas à flexão aos 28 e 42 dias apresentam algumas diferenças a nível de resistência, como pode ser verificado nas figuras 5.21 e 5.22, respetivamente.

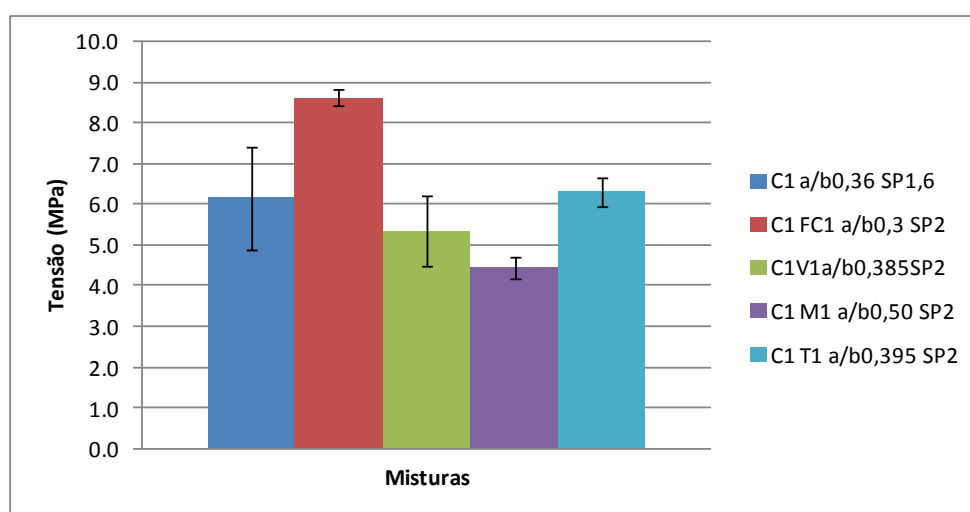


Figura 5.21 - Resistência à flexão aos 28 dias

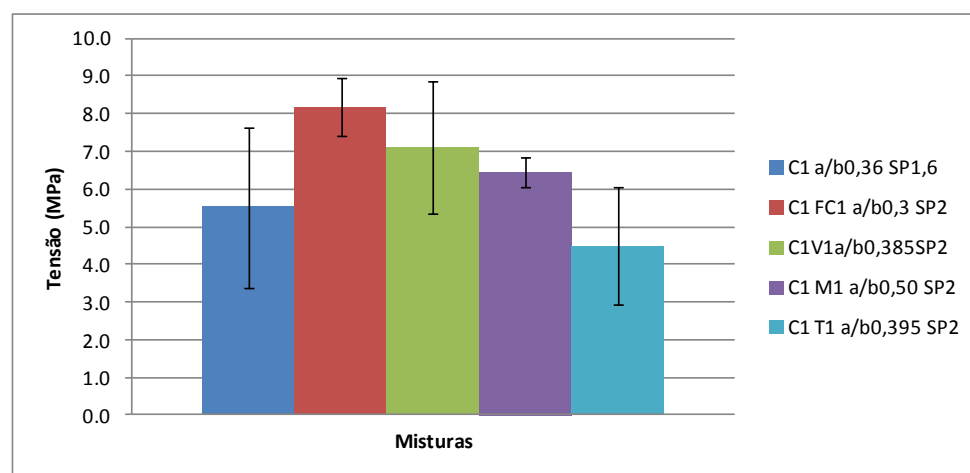


Figura 5.22 - Resistência à flexão aos 42 dias

Dos corpos de prova ensaiados à flexão aos 28 dias (figura 5.21), os constituídos pela calda CFC destacam-se por possuírem maior resistência (cerca de 8,5 MPa) e a calda CM é das que apresenta resistência inferior, aproximadamente metade da mistura referida anteriormente. As restantes (CV, CT, C) apresentam sensivelmente a mesma resistência à tração por flexão, num intervalo de 5 a 6 MPa.

Contudo, aos 42 dias de cura são verificadas diferenças nos comportamentos das misturas (figura 5.22). As caldas CV e CM, que eram, aos 28 dias os menos resistentes, tiveram um aumento de 30 e 45%, respectivamente, de resistência à flexão. Este aumento deve-se às reações pozolânicas (mencionadas no capítulo 3) desenvolvidas no decorrer do tempo. Como esperado, nas caldas sem características pozolânicas (C e CFC) não são verificadas alterações relevantes de resistência (figuras 5.21 e 5.22).

Por surpresa, os resultados obtidos de resistência à flexão aos 42 dias da calda CT são inferiores cerca de 30% aos dos 28 dias (figuras 5.21 e 5.22), esta redução parece não ser coerente, visto se esperarem aumentos de resistência por eventuais características pozolânicas do pó cerâmico. Caso se confirme o potencial pozolânico desta adição, sugere-se que se efetuem mais ensaios a esta calda para que se aceitem ou excluam estes resultados por eventuais erros de confecção dos corpos de prova e/ou realização do ensaio.

5.2.1.2 Resistência à Compressão

As caldas quando ensaiadas à compressão aos 28 e 42 dias revelam ter diferentes resultados de resistência, como ilustram as figuras 5.23 e 5.24.

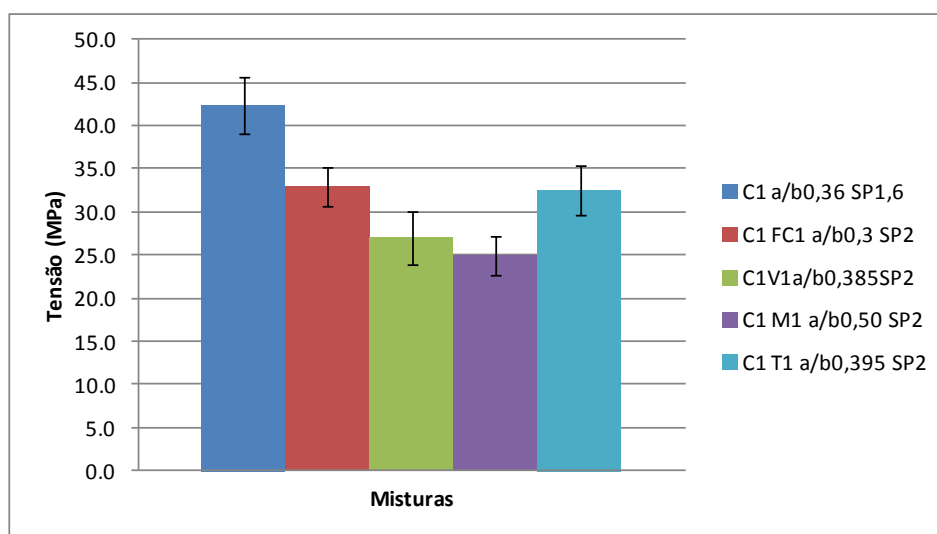


Figura 5.23 - Resistência à compressão aos 28 dias

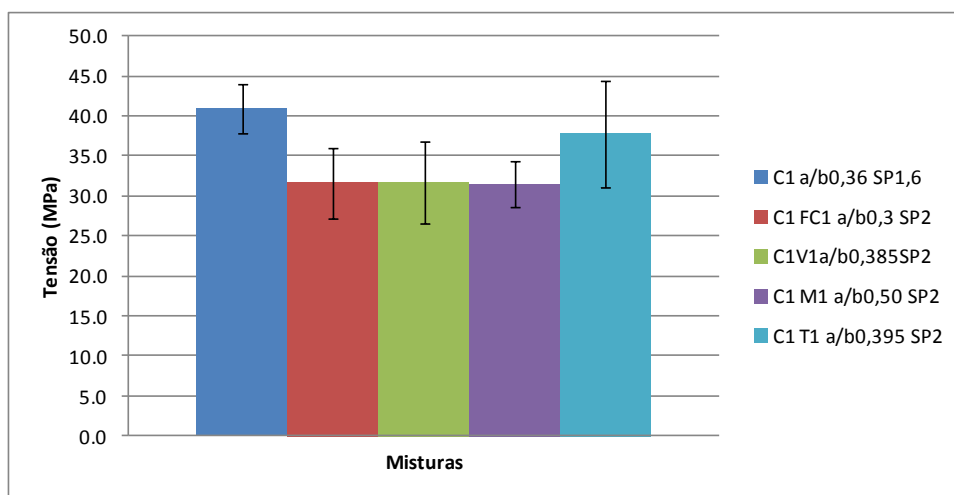


Figura 5.24 - Resistência à compressão aos 42 dias

Nos ensaios de resistência à compressão das caldas aos 28 dias identificam-se três patamares de resistência (figura 5.23), dos quais, a que tem maior resistência, como esperado, é a calda de cimento (aprox. 40MPa). Seguindo-se das caldas CFC e CT com resistências aproximadas de 30 MPa. Nesta idade as misturas CV e CM são as que possuem resistências inferiores (aprox. 25 MPa).

Aos 42 dias de cura, é evidenciado o contributo pozolânico das adições de pó vidro, metacaulino e pó cerâmico, pois dos 28 dias até à data do ensaio, as caldas com estas adições têm um incremento de resistência à compressão cerca de 20% (figuras 5.23 e 5.24). Nas restantes misturas (C e CFC) não se observam diferenças nas respetivas capacidades resistentes (figuras 5.23 e 5.24), pois estas realizam apenas reações de hidratação do cimento, por não possuírem características pozolânicas.

Efetuada-se uma análise dos resultados de resistência à compressão aos 42 dias (figura 5.24) com intuito de comparar as resistências entre caldas, observa-se que a resistência da mistura CT aproxima-se da calda de cimento, evidenciando-se o contributo positivo da adição de pó cerâmico. A calda CFC mantém a resistência, que é alcançada pelas misturas CV e CM devido aos compostos resistentes formados nas reações pozolânicas.

Com os ensaios à compressão, foram comprovadas as supostas características pozolânicas do pó cerâmico referidas na discussão de resultados dos ensaios à flexão. E desta forma consideram-se prudentes novos ensaios numa maior quantidade de amostras, no intuito das dúvidas suscitadas no comportamento da calda CT sejam minimizadas.

5.2.1.3 Relação entre resistência à tração e compressão

Os gráficos apresentados pelas figuras 5.25 e 5.26 possibilitam que se verifiquem quais as caldas que apresentam maior ductilidade. Para tal, efetua-se a relação entre a resistência de tração por flexão e a resistência à compressão, sendo as mais dúcteis, aquelas que apresentarem valores mais elevados.

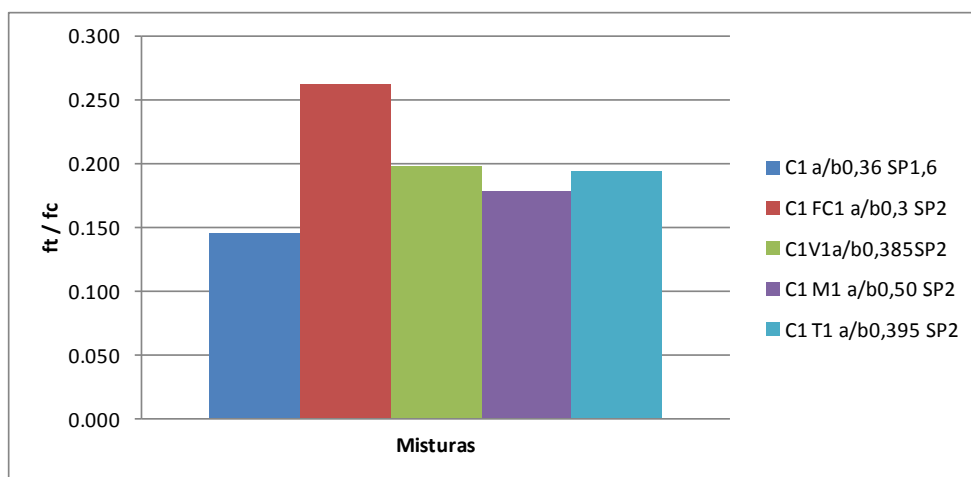


Figura 5.25 - Relação entre resistência à tração e compressão aos 28 dias

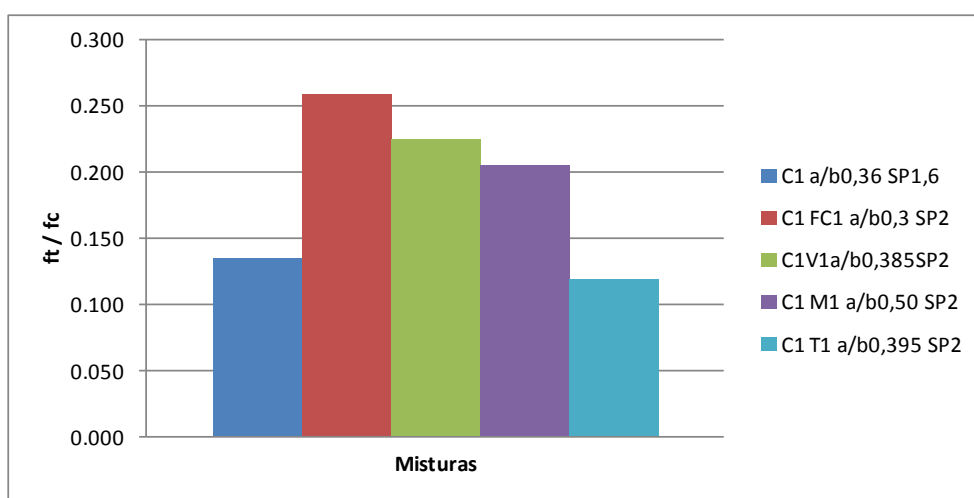


Figura 5.26 - Relação entre resistência à tração e compressão aos 42 dias

Aos 28 dias de idade, verificam-se 3 patamares de ductilidade (figura 5.25), onde a calda C é a que tem um comportamento mais frágil, sendo a sua resistência de tração por flexão cerca de 15% da de compressão, enquanto a calda mais dúctil (CFC) possui uma relação aproximada de 25%. As restantes (CM, CT e CV) possuem aos 28 dias de idade uma relação de resistência à tração por flexão que ronda os 20% da de compressão.

Em relação aos ensaios realizados aos 42 dias (figura 5.26), as misturas CV e CM aumentam cerca de 15% as suas ductilidades, enquanto as caldas C e CFC não sofrem alterações de ductilidade. Tendo em consideração os resultados anteriores, era previsível que ambas as misturas (C e CFC) não teriam alterações de ductilidade, mantendo-se ainda assim a mistura CFC a mais dúctil.

A calda CT evidencia uma forte perda de ductilidade, tornando-se 40% mais frágil dos 28 aos 42 dias (figuras 5.25 e 5.26). Este resultado não é aceite, considerando-se que existiu alguma anomalia na confeção dos corpos de prova.

5.2.1.4 Relação entre resistência à compressão e razão a/c

Neste ponto será relacionada a resistência à compressão das caldas com a razão a/c aos 28 e 42 dias de idade, para que seja verificada ou não, a conformidade com conhecida curva de Abrams que relaciona a resistência à compressão de betões e/ou argamassas com a razão a/c.

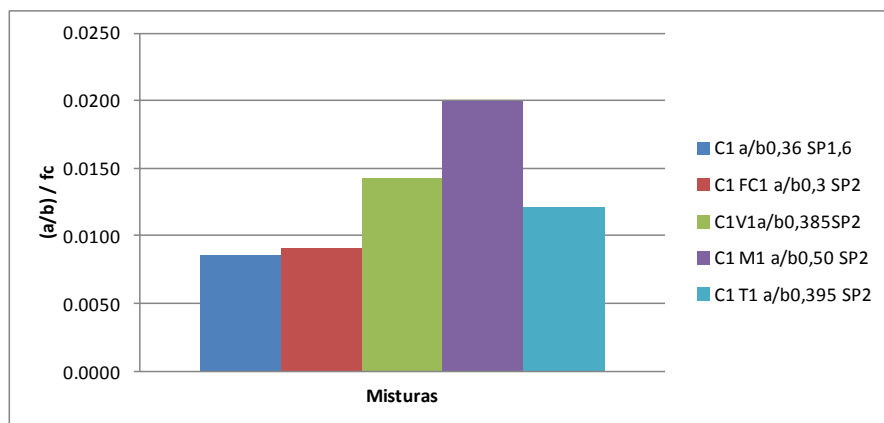


Figura 5.27 - Influência da razão água/materiais sólidos na resistência à compressão aos 28 dias

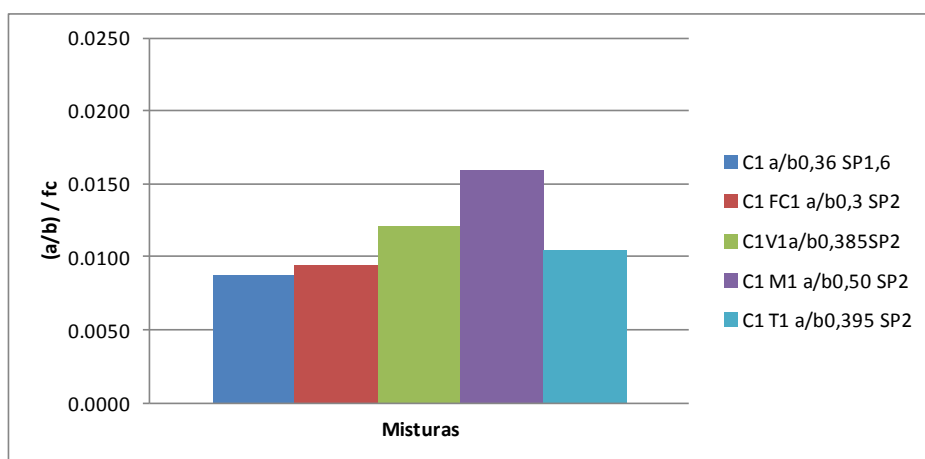


Figura 5.28 - Influência da razão água/materiais sólidos na resistência à compressão aos 42 dias

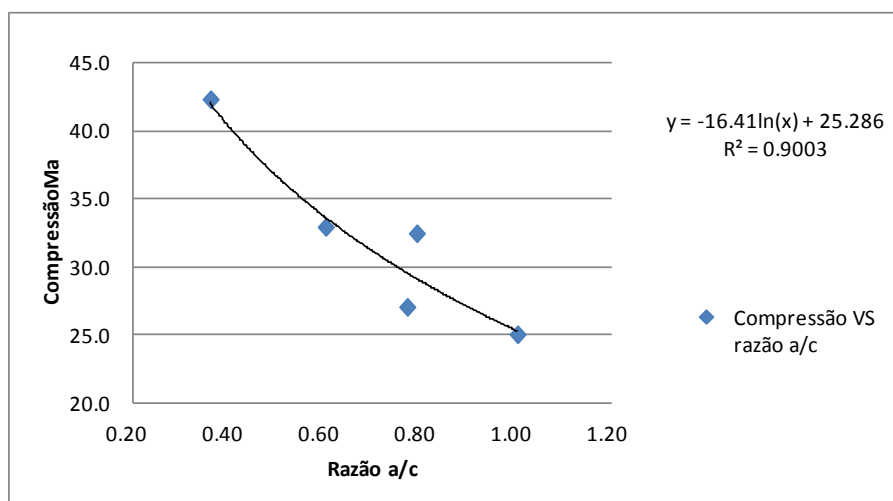


Figura 5.29 - Relação entre a resistência à compressão e a razão água/cimento aos 28 dias

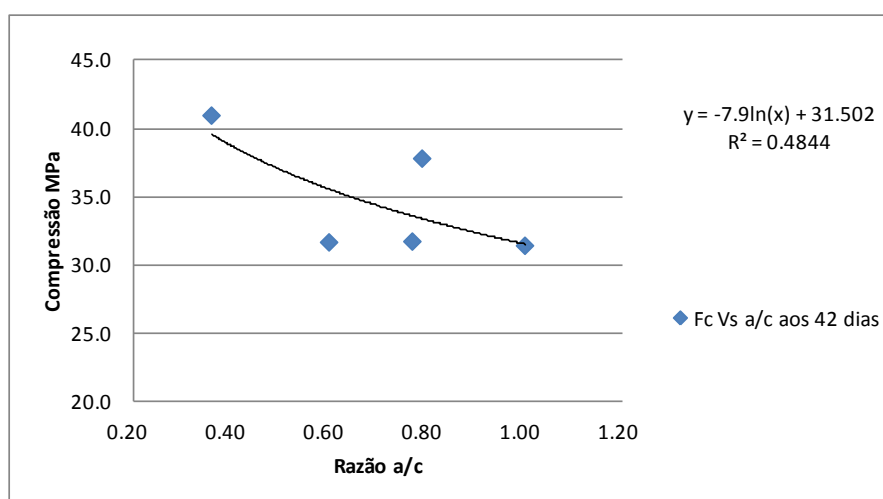


Figura 5.30 - Relação entre a resistência à compressão e a razão água/cimento aos 42 dias

As misturas aos 28 dias de idade seguem o modelo da curva de Abrams (figura 5.29), este refere que, na medida em que se aumentam as razões de água/cimento verificam-se reduções de resistência à compressão das pastas de natureza logarítmica. Tal comportamento, deixa de ser evidente aos 42 dias (figura 5.30), pois algumas misturas possuem características pozolânicas, que lhes conferem continuidade de aumento de resistência passados os 28 dias, enquanto nas misturas C e CFC não são verificados aumentos de resistência dos 28 aos 42 dias.

5.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Através da velocidade de propagação de impulsos ultrassons e da densidade das misturas calculou-se o módulo de Young (elasticidade dinâmico) com a fórmula 4.5.

Os resultados obtidos podem ser visualizados na figura 5.31

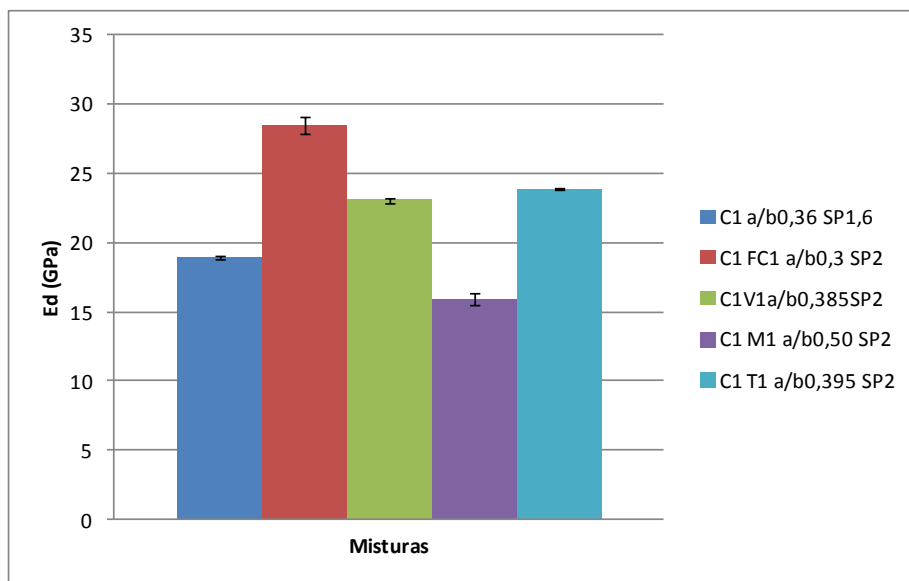


Figura 5.31 - Módulo de elasticidade dinâmico

Da análise de resultados da figura 5.31, verifica-se que a calda CFC é a que possui maior valor de módulo de elasticidade (aprox. 28 GPa), enquanto as caldas C e CM são as que apresentam resultados inferiores, próximos de 17 GPa, sendo o módulo de elasticidade da mistura CM ligeiramente inferior. Numa posição intermédia, com módulos de elasticidade próximos dos 27 GPa, estão as misturas CV e CT.

De seguida pretende-se verificar se existe correlação entre o módulo de Young e a resistência à compressão.

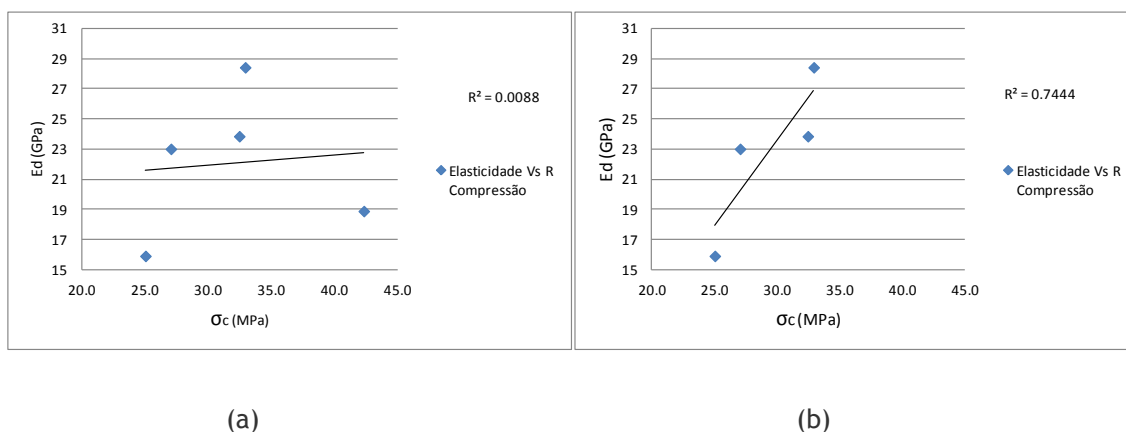


Figura 5.32 - Relação entre módulo de Young e resistência à compressão, (a) inclui calda C e (b) apenas caldas com adições

Da análise dos resultados da figura 5.32, confirma-se que nas misturas com adições, o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da resistência à compressão (figura 5.32(b)), no entanto, quando se inclui a calda de cimento (figura 5.32(a)), a correlação deixa de ter estatisticamente significado. Este acontecimento deve-se à mistura C comparativamente às restantes, possuir resistência elevada (42,5 MPa) para um módulo de elasticidade baixo (19

GPa). Caso seguisse a tendência dos resultados das misturas com adições, o módulo de elasticidade da calda de cimento incidiria num intervalo de 35 a 40 GPa.

O módulo de elasticidade da calda C está condicionado pela velocidade de propagação das ondas ultrassónicas nos corpos de prova. Comparada com a velocidade de propagação das restantes misturas, a da calda de cimento foi das mais baixas, este resultado está em função da densidade das misturas (tabela 0.11 do anexo A).

5.2.3 Retração

A figura 5.33 apresenta os valores de retração livre das caldas aos 7, 14, 21 e 28 dias de idade. Este ensaio tem como objetivo verificar a retração livre obtida durante os 28 dias que o ensaio foi realizado.

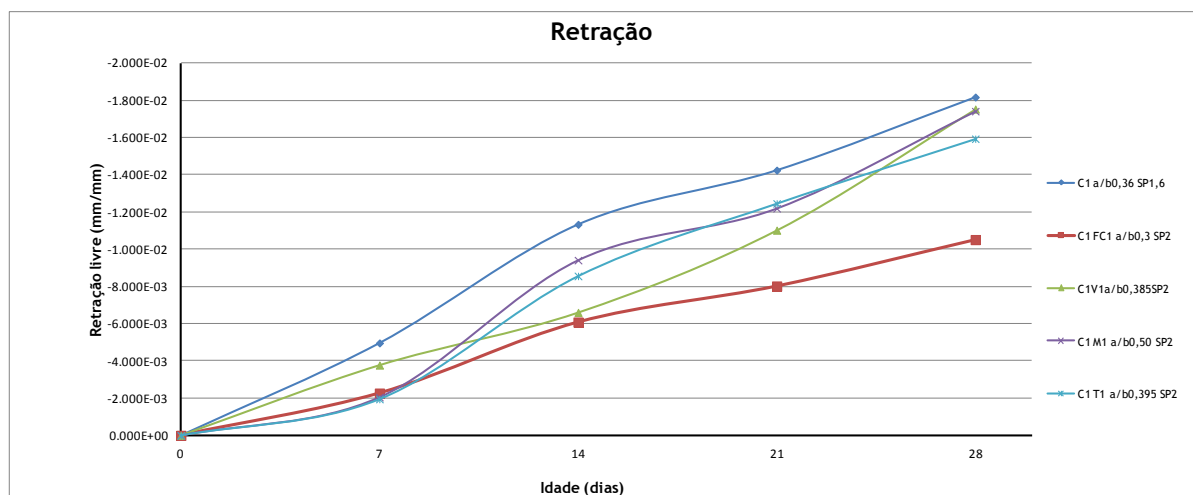


Figura 5.33 - Variação da retração ao longo de 28 dias

Analisando-se os resultados da retração livre ao longo do tempo (figura 5.33), verifica-se que a calda C desde o início da cura dos corpos de prova, é a que apresenta níveis de retração livre superiores. No entanto, aos 28 dias, este fenómeno para caldas com adições pozolânicas aproxima-se do nível de retração da calda cimento, encontrando-se este nível num intervalo de [0,015; 0,019] mm/mm.

A adição de fíler calcário diminui o comportamento retrátil dos provetes ao longo dos 28 dias de ensaio (0,01 mm/mm).

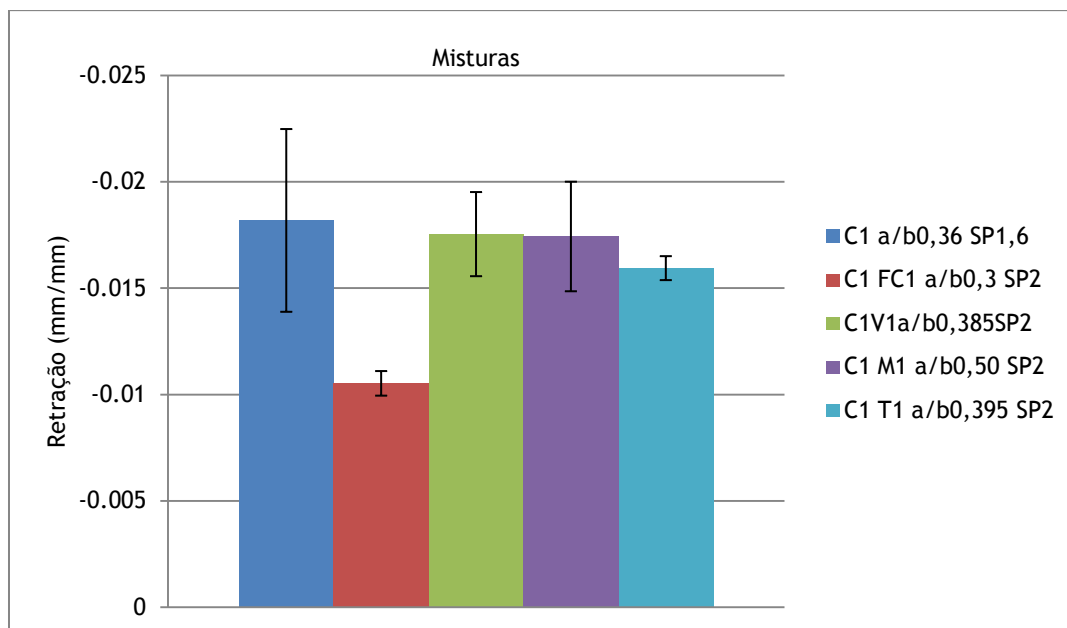


Figura 5.34 - Retração aos 28 dias

Passados 28 dias (figura 5.34), a calda CFC destaca-se por apresentar uma retração inferior à das restantes misturas (C, CV, CM, CT) que possuem retrações semelhantes.

5.2.3.1 Evolução da retração com a perda de massa

Para melhor compreensão do fenómeno de retração, efetuou-se um gráfico (figura 5.35) que ilustra a evolução da retração com a perda de massa

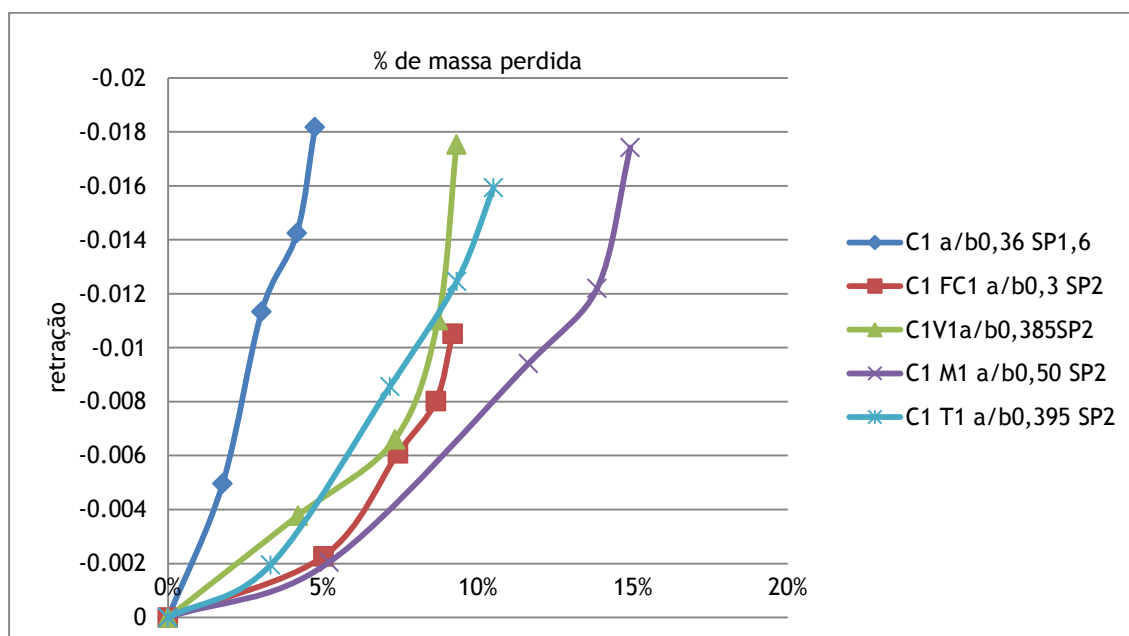


Figura 5.35 - Evolução da retração com a perda de massa

Numa primeira análise dos resultados da figura 5.35, constata-se três tipos de evoluções de retração com a perda de massa.

Ao longo dos 28 dias de cura, a calda de cimento foi a que apresentou maiores valores absolutos de retração (figura 5.35), no entanto, esta é a que tem menores perdas de massa (aprox. 5%), tal facto deve-se à sua razão água/cimento ser sensivelmente metade das outras caldas.

As caldas CV e CT têm uma razão a/b aproximada de 0,39, este fator contribui na evolução da perda de massa, visto esta ser idêntica em ambas durante os 28 dias de ensaio.

Na análise do comportamento das caldas com adições nos primeiros 7 dias (figura 5.35), apesar de se identificarem perdas significativas de massa (aprox. 4%), o nível de retração ronda apenas 10% do valor desta aos 28 dias de cura. Nestas misturas, após 14 dias, a evolução da retração deu-se de forma parecida à do cimento, isto é, evolui com baixas reduções de massa.

Estes resultados parecem mostrar que a utilização de adições em substituição parcial do cimento influencia o processo de hidratação do cimento.

Julga-se que nas primeiras idades das caldas com adições, a perda de massa reflete-se essencialmente na evaporação da água dos corpos de prova. A calda CM, devido à grande percentagem de água utilizada (figura 5.35), faz com que esta tenha grandes perdas de água numa primeira fase, tal como as outras misturas com adições. Dos 14 aos 28 dias também há perda de massa, mas desta vez com menores intensidades para um valor significativo de retração (figura 5.35).

A mistura CFC durante os primeiros 7 dias tem um comportamento idêntico à calda CM, no entanto, passados 28 dias possui cerca de 60% da retração das restantes caldas. Esta calda (CFC) foi a que apresentou menor retração (figura 5.34 e 5.35), eventualmente por ser a mistura que possui menor razão a/b.

5.2.4 Capilaridade

A absorção de água por capilaridade traduz a velocidade de absorção de uma calda, baseada no coeficiente de capilaridade e da quantidade de água absorvida. Com base nas curvas de absorção de água, são apresentados os respetivos coeficientes de capilaridade na figura 5.36

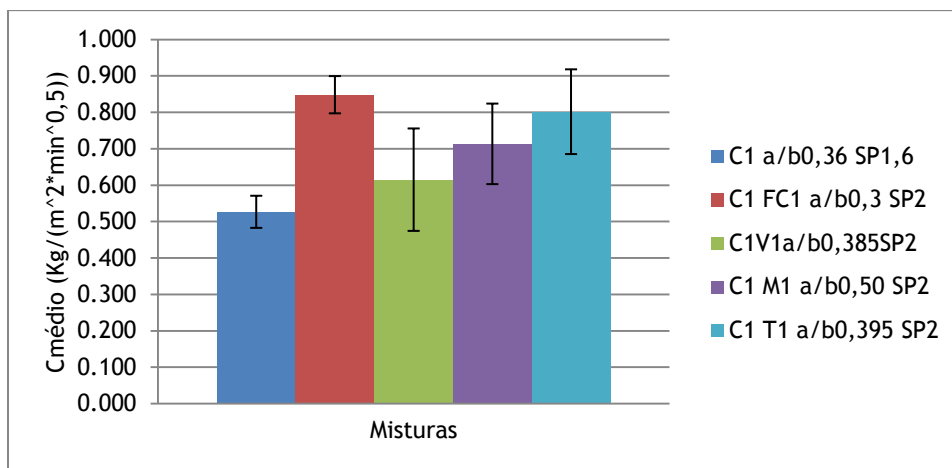
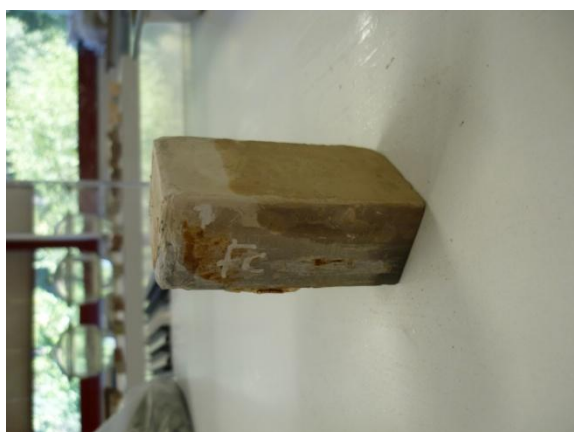


Figura 5.36 - Coeficiente de capilaridade

No ensaio de capilaridade (figura 5.36) verificou-se que a mistura C destaca-se por absorver menor quantidade de água por capilaridade.

As misturas compostas por adições com características pozolânicas (CM, CT e CV) possuem absorção capilar de difícil análise devido ao elevado desvio padrão, pelo que se consideram com esta propriedade semelhante. A calda CT, também devido à imprecisão de resultados, chega a ser das misturas com maior capacidade de absorção de água por capilaridade, equiparável à da mistura com adição de fíler calcário.

A figura 5.37 ilustra como a substituição parcial (50%) do cimento por adições contribui na formação de poros capilares que por sua vez potenciam o fenómeno de sucção por capilaridade.



(a)



(b)

Figura 5.37 - a) Ensaio de capilaridade, (a) com calda CFC e (b) calda sem adições

Como se observa na figura 5.37(a), A calda que possui a adição de fíler calcário apresenta uma mancha de água não uniforme. Esta atinge níveis superiores em relação ao corpo de

prova sem adições. Assim sendo verifica-se que a existência de capilares é mais concentrada na face que possui maior concentração de adição.

Julga-se que a existência de maior concentração de capilares na secção superior do corpo de prova foi potenciada pelo processo de endurecimento das misturas. Estas foram endurecidas em moldes prismáticos impermeáveis, caso se simulasse um meio poroso para o efeito, parte da água utilizada para dar fluidez às caldas era absorvida, e provavelmente se atenuaria a segregação em repouso observada na figura 5.9.

Capítulo 6

6 Conclusão

Ao longo do presente trabalho foram apresentados e discutidos os resultados de uma campanha experimental, esta limitada ao tempo estipulado para a elaboração da dissertação. Neste estudo, as caldas desenvolvidas foram submetidas a testes no estado fresco e endurecido. Os testes pretenderam verificar se estas respeitam os requisitos reológicos, físicos e mecânicos adequados para o uso da técnica de injeção de paredes, por exemplo de três panos, em alvenaria de pedra. Técnica esta comumente empregada na consolidação de construções em alvenaria.

Os ensaios realizados permitiram a formulação de conclusões sob a reserva de que o número de corpos de prova utilizados neste estudo limitou-se ao mínimo prescrito pelas normas. No entanto, parece estabelecer-se conclusões com alguma segurança nos seguintes parágrafos.

Propriedades das caldas no estado fresco:

Relativamente à trabalhabilidade das caldas, verificou-se que o uso de adições aumenta o espalhamento destas, e que a necessidade de água para uma dada fluidez, aumenta com a finura, isto é, com o aumento da superfície específica das partículas.

Algumas caldas apresentaram problemas de estabilidade, facto este relacionado com as percentagens elevadas (50%) de substituição de cimento Portland por adições. É exemplo a mistura CM que revelou possuir 6% de exsudação, porque além do motivo mencionado esta possui elevada quantidade de água em comparação com as restantes misturas. A calda CV tem igual percentagem de exsudação, mas esta está relacionada com a impermeabilidade das partículas. Também se verificou que para estas percentagens de substituição ocorrem problemas de segregação.

Do ensaio de injetabilidade, apurou-se a calda com adição de pó cerâmico como a mais facilmente injetável, ou seja, com melhor capacidade de penetração.

Ensaio reológicos mostraram que todas as misturas desenvolvidas são fluidos dilatantes que seguem o modelo de Herchel-Bulkley. Sendo a capacidade reoespessante das misturas potenciada ao longo do ensaio com a utilização de adições. Ainda neste estudo verificou-se que as percentagens de adições empregadas diminuem a viscosidade das misturas, e se conjugado com grandes quantidades de água, este parâmetro ainda é mais reduzido.

A calda CV é das misturas mais fluidas, com menos viscosidade, no entanto não é das que possui maior razão a/b , isto deve-se à morfologia do vidro.

Em termos de comportamento tixotrópico, as misturas C, CV e CB apresentam maiores áreas de curvas histereses, o que indica que estas se reconstroem mais rapidamente que as restantes caldas (CFC, CM e CT).

Propriedades das caldas no estado endurecido:

A substituição de 50% de cimento por adições reduz cerca de 30% a resistência à compressão aos 28 dias comparativamente à calda de cimento, contudo, as reações pozolânicas continuam a desenvolver compostos resistentes, e aos 42 dias, as misturas CM, CT e CV, têm um incremento de tensão próximo de 20%.

Relativamente à resistência à flexão, a mistura CFC é a mais resistente. E com a relação (ft/fc) aferiu-se que utilizações de grandes percentagens de adições (50%) aumentam a ductilidade das caldas.

Aos 28 dias de idade, as caldas seguem o comportamento previsto pela curva de Abrams, onde a resistência à compressão decresce com o aumento da relação a/c . No entanto, aos 42 dias, tal não se verifica devido aos incrementos de tensão provocados pelas reações pozolânicas desenvolvidas.

Existe correspondência entre a resistência à compressão das misturas com adições e o módulo de elasticidade dinâmico, o módulo de elasticidade aumenta com a resistência à compressão. A calda CFC foi a que mostrou possuir valores mais elevados. Todavia, a calda de cimento é a que possui maior resistência de compressão e o módulo de elasticidade não. Isto deve-se à relação entre a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas e a densidade das misturas.

O fenómeno de retração, bem como a velocidade com que este se desenvolve, é reduzido com a adição de fíler calcário.

A relação a/c influencia o comportamento de retração ao longo do tempo. Misturas com adições têm perdas de massa nos primeiros dias essencialmente por evaporação de parte da água utilizada para que fosse atingida a fluidez desejada.

A substituição parcial do cimento por adições nas quantidades estudadas, potencia a absorção de água por capilaridade quando a cura dos corpos de prova é feita em moldes impermeáveis.

Conclusões finais:

Num período de globalização e desenvolvimento tecnológico, em que a preocupação com o meio ambiente e escassez de recursos naturais tem vindo a aumentar. Especificamente, a indústria de construção civil necessita de aumentar a sustentabilidade, visto na sua cadeia produtiva prejudicar o ambiente nas diferentes etapas de extração de matéria-prima, produção de materiais, construção e demolição.

Neste ponto de vista os objetivos foram cumpridos na totalidade, visto ter-se substituído metade da quantidade de cimento por adições recicláveis de demolições (pó de telha), de aproveitamento de resíduos (pó de vidro) e de metacaulino que na sua produção necessita de consumos energéticos muito inferiores aos do cimento. Além deste, nos parágrafos anteriores de conclusões foram referidas outras mais-valias nas propriedades das caldas proporcionadas pela utilização de adições.

No entanto, também surgiram algumas inconveniências. Neste estudo experimental, por consequência ao uso de quantidades elevadas de adição, obtiveram-se resultados preocupantes de exsudação que se refletiram em problemas de segregação. Os níveis de exsudação foram em alguns casos (caldas CM e CV) três vezes superiores aos aconselhados pela NP447 (2%), no entanto, os valores referentes a essa norma estão associadas à utilização de caldas em bainhas de injeção, onde o ambiente é impermeável, contrariamente ao que se pretende utilizar. Estudos efetuados por outros autores comprovam que em ambientes em que existe porosidade, problemas com a exsudação são minimizados, visto que o próprio suporte absorve parte da água que foi utilizada para dar fluidez necessária às caldas para que estas fossem injetadas.

Pensado como um futuro engenheiro em que todas as ações têm de ser tomadas com responsabilidade, apesar de considerar que a utilização destas misturas pudesse vir a fomentar um negócio fluorescente no mundo das caldas para reabilitação, não arriscaria a utilizá-las sem antes se realizarem novos ensaios que recomendarei nos trabalhos futuros.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Continuando, antes de se introduzirem estas caldas no mercado teriam de se realizar ensaios de injetabilidade, por exemplo em paredes de três panos de alvenaria de pedra. Podendo-se assim comparar os resultados obtidos com os existentes na literatura técnica referente à consolidação deste tipo parede. Contudo ainda se recomendam outros estudos para que se minimizem os riscos do insucesso, tais como:

- Estudo das propriedades, no estado fresco e endurecido, das caldas com adições moldadas num meio poroso;

- Analisar-se o comportamento de misturas binárias e/ou ternárias com a redução gradual da percentagem de substituição de cimento, com objetivo primordial de analisar a exsudação e segregação das caldas;
- Analisar a influência do uso das várias percentagens de utilização de adições, sendo misturas binárias ou ternárias, na durabilidade das caldas;
- Analisar a influência do uso das várias percentagens de utilização de adições, sendo misturas binárias ou ternárias, quando estas são submetidas a condições extremas, tais como os ciclos de gelo-degelo e ação do fogo.

Referências Bibliográficas

- [1] Norma Portuguesa NP EN 445:2008 - *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço - Métodos de ensaio*, IPQ, Lisboa, 2008.
- [1] Liliana C.D. - Estudo de caldas de injeção para consolidação de revestimentos, Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, 2011
- [2] Silva, Rui - Caracterização experimental de alvenaria: Reforço e efeitos diferidos. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, 2008. Disponível na internet em: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/9036/1/Tese_Rui%20Silva.pdf
- [3] ICOMOS- Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitetónico, Departamento de Engenharia civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2004
- [4] Roque J. - Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2002.
- [5] Binda L. -The Difficult Choice of Materials Used for the Repair of Brick and Stone Masonry Walls, 1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, Cairo, Egypt, 2006
- [6] Norma Portuguesa NP EN 447:2000 - *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço - Especificações para caldas correntes*, IPQ, Lisboa, 2000.
- [7] Coutinho, Joana - *Materiais de Construção 2 - 1ª Parte - Ligantes e Caldas* 2002, actualização 2006, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. [Consult. 22 Fev 2012]. Disponível na internet em: <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ligantes2006.pdf>.
- [8] Sousa Coutinho, A - *Fabrico e Propriedades do Betão*, L.N.E.C. Vol. I e II, 1973.
- [9] Kaefer, Luís - Considerações sobre a microestrutura do concreto. [consult. 22 Fev 2012] Disponível na internet em: http://www.engenhariaconcursos.com.br/arquivos/Materiais/microestrutura_do_concreto.pdf
- [10] Pinto, Amândio - *Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino*, E.E.U.Minho, Guimarães, 2004. [Consult. 23 Fev 2012] Disponível na internet em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/671>.
- [11] Coutinho.A.deS. - *Fabrico e propriedades do betão*. Lisboa: LNEC editora. v.1.1997.
- [12] Malhotra, V.M. *Superplasticizers - A global review with emphasis on durability and innovative concretes*. In: international conference on superplasticizers and other chemical admixtures en concrete. 3. Proceedings. Ottawa. Canada: V.M. Malhotra Editor., 1989.
- [13] Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland, Boletim Técnico da escola politécnica da USP. Disponível em: http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BTs_Petreche/BT330-%20Hartmann.PDF.

- [14] Um novo conceito de superplastificante [Consult. 11 Ago 2012]. Disponível na internet em: <http://www.basf-cc.com.br/PT/informacao/artigostecnicos/Pages/Artigo5.aspx>.
- [15] Norma Portuguesa NP EN 206-1:2005 - Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, CEN, Bruxelas, 2005.
- [16] Nepomuceno, Miguel - Metodologia para a Composição de Betões Auto-Compactáveis, Dissertação de Douramento apresentada na UBI, Covilhã, 2005.
- [16] de Mello, Karoline - Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário, UFSC, 2005.
- [17] M. Bédérina, M.M. Khenfer, R.M. Dheilly, M. Quéneudec - Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. Artigo disponível na internet em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604003151>
- [18] SONEBI, M.; BAHADORI-JAHROMI, A.; BARTOS, P. J. M. Development and optimization of médium strength self-compacting concrete by using pulverized fly ash. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. Proceedings... France: RILEM Publications, 2003.
- [19] Massazza, F. Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: Helett, P. C. (ed.), Leas's Chemistry of Cement and Concrete, 4^a edition, Arnold Publishers, London, 1998
- [20] Coutinho, A de Sousa - Fabrico e Propriedades do betão, Volume 1, LNEC, 1988
- [21] Guilherme Chagas Cordeiro - Concreto de alto desempenho com metacaulinita, UENF, 2001.
- [22] Aitcin, P. - Concreto de Alto desempenho. Ed. PINI: São Paulo, SP. Tradução de Geraldo G. Serra, 2000.
- [23] Vieira, A., P. - Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos, Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana, UFP, 2005.
- [24] NP EN 197-1:2001/A 1:2005 - Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, IPQ, Caparica, 2005.
- [25] Sampaio, J., Sousa Coutinho, J., Sampaio, M.N. - Melhoria do Desempenho de Betões pelo Metacaulino, 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 2000.
- [26] Davidovits, J. - Man Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement, Journal of Materials Education, Vol. 16, n°s 2&3, 1994.
- [27] Santos, P. Souza; Ciência e tecnologia de argilas. 2. ed. Sao Paulo: Edgard Blucher, 1992.
- [28] Júnior, Gilberto - Avaliação do processo industrial da cerâmica vermelha na região do Deridó - RN, Tese de doutorado, UFRN, 2010. Disponível na internet em: http://bdtd.bczm.ufrn.br/tesesimplificado//tde_arquivos/10/TDE-2010-12-28T070837Z-3214/Publico/GilbertoBJ_TESE_capa%20ate%20pg200.pdf.

- [29] Júnior, Agnaldo - Avaliação da resistência à compressão de concreto utilizando adição de resíduos de cerâmica vermelha, Monografia apresentada para obtenção da aprovação da disciplina Projeto Final II, UFSC, 2011. [consult 3 Ago 2012]. Disponível na internet em: <http://civil.uefs.br/DOCUMENTOS/AGNALDO%20DO%20NASCIMENTO%20JUNIOR.pdf>.
- [30] GONÇALVES, J. P. - Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial, Tese de doutoramento COPPE/UFRJ, 2005.
- [31] Junior, Carlos; Rondon, OdilarCarlos - Reaproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha na construção civil [Artigo em linha]. [Consult. 19 Fev. 2012]. Disponível na Internet em: <http://www.propp.ufms.br/gestor/titan.php?target=openFile&fileId=553>
- [32] Ortiz, S.A. O Vidro e as Embalagens de Vidro. CETEA/ITAL, Campinas, Brasil, 1996
- [33] Maltha, J. C.; Dalmijn, W. L.; Van Houwelingen, J. A. - Glass Recycling Towards Year 2000. Proceedings of the International Recycling Congress, v.3, Geneva, 1993.
- [34] PEDRO, J. O. - Dimensionamento das barragens abóbada pelo método dos elementos finitos. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1977. (Memória; nº 479).
- [35] Mehta, P.K. 2002. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. Concrete International, Vol. 24, No. 7, July 2002.
- [36] Foradaba, J. S. - Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón”, Tese, Departamento de Construção, Escola Superior Técnica de Caminhos, Canais e Portos de Barcelona, Universidade Politecnica de Catalunha, Barcelona, Julho, 2005
- [37] Taha, Bashar; Nounu, Ghassan - Using lithium nitrate and pozolanic glass powder in concrete as ASR suppressors. Cement & Concrete Composites 30, 2008, United States.
- [38] Taha, B., Nounu - G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 21 March 2007.
- [39] Nathan Schwarz, Narayanan Neithalath - Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. Cement & Concrete Composites 30, 2008, United States.
- [40] Matos, Ana Mafalda - Estudo de argamassas com substituição parcial do cimento por resíduos de vidro moídos, Tese de mestrado integrado, FEUP, 2010. Disponível na internet em: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/59733?mode=full>.
- [41] Silva, Diogo - Optimização de caldas de cimento para trabalhos de injeção em Geotecnia, Tese de mestrado, ISEL, 2010. Disponível na internet em: <http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/431/1/Optimiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20caldas%20de%20cimento%20para%20trabalhos%20de%20injec%C3%A7%C3%A3o%20.pdf>.
- [42] Nunes, Sandra - Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades, «Dissertação

- de Mestrado em Engenharia Civil apresentada na FEUP», Porto, 2001
- [43] Especificação LNEC E372-1993 - Água de Amassadura para Betões: Características e Verificação da Conformidade.
 - [44] Cardoso, F. A. - Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico. São Paulo, 2009. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
 - [45] Helena Maria da Costa Paiva - Caracterização reológica de argamassas, Universidade de Aveiro, 2005. Dissertação de Mestrado disponível na internet em: <http://ria.ua.pt/bitstream/10773/2239/1/2005001724.pdf>
 - [46] Oswald T. A Polymer Processing Fundamentals, Munic, Hanser Publishers, 1994.
 - [47] Barra, Guilherme - Apostila de processos 4, Parte 1: Fundamentos de reologia de materiais poliméricos. Disponível na internet em: <http://emc5744.barra.prof.ufsc.br/Reologia%20parte%201.pdf>
 - [48] Reologia e modificadores reológicos. http://www.freedom.inf.br/artigos_tecnicos/hc56/ricardopedro.asp
 - [49] A.L.de Castro, J.B.L. Liborio, V.C. Pandolfelli - Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil - Revisão. Artigo disponível na internet em: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v57n341/v57n341a09.pdf>.
 - [50] Cataogo Viskomat NT - Rheometer f. Mortar and Paste. Disponível na internet em: http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%AO:Viskomat_NT_-_Rheometer_f._Mortar_and_Paste
 - [51] Ficha do cimento Portland CEM II/B-L 32,5N, SECIL. Disponível na internet em: <http://www.secil.pt/pdf/CEMIIBL325N.pdf>
 - [52] Duarte Miguel Figueira Pereira Fernandes - Influência de adições na mitigação da reacção álcalis-sílica (RAS) em betão com agregados reciclados, UBI.
 - [53] Ficha do superplastificante Sika® ViscoCrete® 3005. Disponível na internet em: http://prt.sika.com/dms/getdocument.get/e47288e9-d9d1-35a8-9ba4-081d0e288956/04%20Sika%20ViscoCrete%203005%20_01.004.pdf
 - [54] Norma Britânica BS EN 1015-06:1999 - Determination of bulk density of fresh mortar, BSI, 1999
 - [55] Norma Francesa NF P 18-891 (1986) - Produits spéciaux destines aux constructions en béton hydraulique - Produits pour injections dans des structures en béton - Essai d'injectabilité à la colonne de sable en milieux sec et humide, 1986.
 - [56] Ribeiro, Nuno - Caldas de injeção cimentícias para bainhas de pré esforço. FEUP, Porto, 2008. [Consult. 25 Jan.2012]. Tese de mestrado. Disponível em <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58050/1/000129589.pdf>.
 - [57] Cardoso, F. A. - Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico, Tese de Doutoramento

apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

- [58] Lee On Yee - Study of earth-grout mixtures for rehabilitation, Dissertação de Mestrado, 2009.
- [59] Norma Europeia EN 1015-11:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, CEN, 1999
- [60] Norma Britânica BS EN 1015-10:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar, CEN, 1999
- [61] Norma Britânica para Testing concrete BS 1881-203 - Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, 1986.
- [62] Norma Europeia EN 1015-18:2002 - Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, CEN, 2002
- [63] http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140577432008000200001&script=sci_artt ext. [Consult. em 10 Out 2012)

ANEXOS

ANEXO A

Apresentação de resultados

Tabela 0.1 - Lista de quantidades

Misturas	Materiais secos (b)						a/b	SP
	C	FC	V	M	T	B		% de b
C1a/b0,36SP1,6	1	-	-	-	-	-	0.36	1.6%
C1 FC1 a/b0,3SP2	1	1	-	-	-	-	0.3	2.0%
C1V1a/b0,385SP2	1	-	1	-	-	-	0.385	2.0%
C1M1 a/b0,50SP2	1	-	-	1	-	-	0.5	2.0%
C1T1 a/b0,395SP2	1	-	-	-	1	-	0.395	2.0%
C1B1 a/b0,75P2,5	1	-	-	-	-	1	0.75	2.5%

Propriedades das caldas no estado fresco:

Tabela 0.2

Misturas	Consistência por espalhamento mini-slump(mm)					Fluidez por cone de Marsh
	Distância	flow (mm)	Média	Desv.Pad.	Coef.Var.(%)	Tempo (s)
C1 a/b0,36 SP1,6	Medida 1	165	170	7.1	4.2	17.22
	Medida 2	175				
C1 FC1 a/b0,3 SP2	Medida 1	175	175	0.0	0.0	19.82
	Medida 2	175				
C1V1a/b0,385SP2	Medida 1	210	212.5	3.5	1.7	18.25
	Medida 2	215				
C1 M1 a/b0,50 SP2	Medida 1	200	202.5	3.5	1.7	17.01
	Medida 2	205				
C1 T1 a/b0,395 SP2	Medida 1	165	177.5	17.7	10.0	19.95
	Medida 2	190				
C1 B1 a/b0,75 SP2,5	Medida 1	120	120	0.0	0.0	39,64
	Medida 2	120				

Tabela 0.3

Mistura	Segregação (5min)			Segregação (10min)			Segregação (30min)			Segregação (3h)		
	h	h1	%	h	h1	%	h	h1	%	h	h1	%
C1 a/b0,36 SP1,6	210	0	0.0%	210	0	0.0%	210	0	0.0%	210	0	0.0%
C1 FC1 a/b0,3 SP2	210	4	1.9%	210	8	3.8%	210	27	12.9%	210	27	12.9%
C1V1a/b0,385SP2	200	10	5.0%	200	23	11.5%	200	46	23.0%	200	130	65.0%
C1 M1 a/b0,50 SP2	198	10	5.1%	198	18	9.1%	198	35	17.7%	198	100	50.5%
C1 T1 a/b0,395 SP2	198	5	2.5%	198	10	5.1%	198	27	13.6%	198	75	37.9%

Tabela 0.4

Mistura	Exsudação (3h)			Massa V
	H (mm)	h2 (mm)	%	g/dm ³
C1 a/b0,36 SP1,6	210	4	0.019048	2024
C1 FC1 a/b0,3 SP2	210	6	0.028571	1962
C1V1a/b0,385SP2	200	12	0.06	1825.2
C1 M1 a/b0,50 SP2	198	12.5	0.063131	1827
C1 T1 a/b0,395 SP2	198	5	0.025253	1894.8

Tabela 0.5

Mistura	Injetabilidade						
	T enchimento (s)	Média	DP	Q instalado (s/100ml)	Média	DP	Q (ml/s)
C1 a/b0,36 SP1,6	7.60	7.77	1.26	34.34	35.92	5.74	2.78
	9.11			42.29			
	6.61			31.14			
C1 FC1 a/b0,3 SP2	10.64	9.20	1.26	38.87	36.94	1.71	2.71
	8.67			35.61			
	8.30			36.34			
C1V1a/b0,385SP2	8.73	8.93	0.20	34.25	33.99	0.49	2.94
	9.13			34.29			
	8.94			33.42			
C1 M1 a/b0,50 SP2	8.83	8.31	0.47	37.91	32.93	4.53	3.04
	8.20			31.84			
	7.90			29.04			
C1 T1 a/b0,395 SP2	5.88	6.66	0.99	21.05	24.78	6.54	4.04
	6.32			20.96			
	7.78			32.33			

Propriedades das caldas no estado endurecido

Tabela 0.6

Propriedades das caldas no estado endurecido						
Misturas	σ Flexão (MPa)			σ Compressão (MPa)		
	28 dias	42 dias	razão	28 dias	42 dias	razão
C1 a/b0,36 SP1,6	6.2	5.5	0.89	42.3	41.0	0.97
C1 FC1 a/b0,3 SP2	8.6	8.2	0.95	32.9	31.7	0.96
C1V1a/b0,385SP2	5.3	7.1	1.33	27.0	31.7	1.17
C1 M1 a/b0,50 SP2	4.5	6.4	1.45	25.0	31.4	1.26
C1 T1 a/b0,395 SP2	6.3	4.5	0.71	32.5	37.8	1.17

Tabela 0.7

Desvio padrão			
Flexão		Compressão	
28 dias	42 dias	28 dias	42 dias
1.26	2.14	3.29	3.02
0.20	0.75	2.28	4.37
0.87	1.76	3.08	5.11
0.26	0.39	2.23	2.86
0.36	1.56	2.88	6.68

Tabela 0.8

Ductilidade									
Misturas	(a/b) / f _c			f _{ch}			f _t / f _c		
	28 dias	42 dias	Razão	28 dias	42 dias	razão	28 dias	42 dias	razão
C1 a/b0,36 SP1,6	0.0085	0.0088	1.03	0.402	0.360	0.90	0.145	0.134	0.92
C1 FC1 a/b0,3 SP2	0.0091	0.0095	1.04	0.430	0.437	1.02	0.262	0.258	0.99
C1V1a/b0,385SP2	0.0142	0.0121	0.85	0.343	0.417	1.21	0.198	0.224	1.13
C1 M1 a/b0,50 SP2	0.0200	0.0159	0.80	0.277	0.403	1.46	0.178	0.205	1.15
C1 T1 a/b0,395 SP2	0.0122	0.0104	0.86	0.355	0.367	1.03	0.195	0.119	0.61

Tabela 0.9

Misturas	F _{ch} aos 28 dias		F _{ch} aos 42 dias		razão	σ f / f	
	f (mm)	DP	f (mm)	DP		28	42
C1 a/b0,36 SP1,6	0.402	0.073	0.360	0.073	0.90	15.32449	15.2956
C1 FC1 a/b0,3 SP2	0.430	0.019	0.437	0.042	1.02	20.06739	18.73391
C1V1a/b0,385SP2	0.343	0.025	0.417	0.052	1.21	15.56805	17.06754
C1 M1 a/b0,50 SP2	0.277	0.012	0.403	0.029	1.46	16.09977	15.97898
C1 T1 a/b0,395 SP2	0.355	0.005	0.367	0.066	1.03	17.78606	12.23998

Tabela 0.10

Determinação da densidade das caldas						
Mistura	M.seca (g)	M.saturada (g)	M.imersa (g)	ρ kg/m ³	DP	Média ρ kg/m ³
C1 a/b0,36 SP1,6	445.10	539.20	265.40	1625.64	1.97	1626.87
	460.60	557.80	274.50	1625.84		
	461.70	559.20	275.80	1629.15		
C1 FC1 a/b0,3 SP2	458.20	536.70	278.40	1773.91	2.65	1775.76
	456.60	534.70	277.40	1774.58		
	466.40	545.20	283.00	1778.79		

Determinação da densidade das caldas (continuação)						
Mistura	M.seca (g)	M.saturada (g)	M.imersa (g)	ρ kg/m ³	DP	Média ρ kg/m ³
C1 M1 a/b0,50 SP2	347.50	441.00	200.00	1441.91	3.60	1445.63
	347.30	439.70	199.50	1445.88		
	350.10	442.50	200.90	1449.09		
C1 T1 a/b0,395 SP2	352.00	424.90	206.90	1614.68	5.97	1613.78
	355.40	429.80	208.70	1607.42		
	348.30	419.50	204.40	1619.25		
C1V1a/b0,385SP2	340.00	399.30	194.10	1,656.92	2.76	1658.50
	344.80	403.70	195.60	1,656.90		
	344.80	402.00	194.50	1,661.69		

Tabela 0.11

Ensaio de ultra som Modulo de elasticidade dinâmico										
Mistura	Tempo (μs)	L (mm)	ρ (Kg/m ³)	V (Km/s)	ν (Coef. de Poisson)	Ed (MPa)	Edm (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	Desv. Padrão
C1 a/b0,36 SP1,6	44.3	177.5	1625.64	4.006772009	0.2	18790.63				93.1
	44.0	177.0	1625.84	4.022727273	0.2	18942.90	18897.7	93.10	99.8	
	44.1	177.3	1629.15	4.020408163	0.2	18959.56				
C1 FC1 a/b0,3 SP2	37.3	177.5	1773.91	4.758713137	0.2	28922.73				639.9
	38.0	177.0	1774.58	4.657894737	0.2	27720.74	28448.7	639.94	102.6	
	37.6	178.0	1778.79	4.734042553	0.2	28702.49				
C1V1a/b0,385SP2	36.3	160.0	1656.92	4.407713499	0.2	23176.99				131.5
	36.5	160.0	1656.90	4.383561644	0.2	22923.35	23030	131.55	100.5	
	36.5	160.0	1661.69	4.383561644	0.2	22989.64				
C1 M1 a/b0,50 SP2	44.6	177.0	1441.91	3.968609865	0.2	16350.90				379.6
	45.5	177.0	1445.88	3.89010989	0.2	15753.70	15917	379.62	101.0	
	45.5	176.2	1449.09	3.872527473	0.2	15646.28				
C1 T1 a/b0,395 SP2	35.3	160.0	1614.68	4.532577904	0.2	23883.92				49.1
	35.2	160.0	1607.42	4.545454545	0.2	23911.80	23870.7	49.07	99.8	
	35.4	160.0	1619.25	4.519774011	0.2	23816.36				

Tabela 0.12

Ensaio de retração								
Misturas	Provete	Massa na Descofragem	Leitura na descofragem	Leitura 7d	Leitura 14d	Leitura 21d	Leitura 28d	Massa aos 28d
C1 a/b0,36 SP1,6	1A	517.9	16.188	16.077	15.997	15.948	15.915	489.6
	1B	511.4	15.645	15.601	15.534	15.487	15.439	487.1
	1C	503.9	15.795	15.773	15.695	15.688	15.631	483.7
C1 FC1 a/b0,3 SP2	2A	495.4	16.179	16.155	16.084	16.072	16.052	448.4
	2B	486.7	16.018	15.991	15.952	15.92	15.886	443.0
	2C	498.5	15.892	15.862	15.835	15.81	15.775	453.1
C1V1a/b0,385SP2	3A	423.5	15.81	15.799	15.72	15.688	15.617	390.6
	3B	435.0	16.033	15.932	15.954	15.91	15.839	397.5
	3C	436.3	16.13	16.107	16.064	15.982	15.892	385.9
C1 M1 a/b0,50 SP2	4A	420.0	16.253	16.214	16.104	16.122	16.053	361.3
	4B	413.8	16.803	16.789	16.715	16.673	16.607	356.9
	4C	420.1	16.067	16.045	15.959	15.881	15.824	348.6
C1 T1 a/b0,395 SP2	5A	457.7	16.051	16.038	15.943	15.901	15.866	408.7
	5B	457.0	16.307	16.27	16.2	16.151	16.105	409.4
	5C	458.6	15.687	15.667	15.596	15.548	15.505	410.9

Tabela 0.13

Retração das caldas					
Dias	C1 a/b0,36 SP1,6	C1 FC1 a/b0,3 SP2	C1V1a/b0,385SP2	C1 M1 a/b0,50 SP2	C1 T1 a/b0,395 SP2
0	0	0	0	0	0
7	-0.004966678	-0.002269308	-0.00377806	-0.002053227	-0.001951559
14	-0.011341176	-0.006089027	-0.006608573	-0.009419635	-0.008566368
21	-0.014253838	-0.008025134	-0.011028063	-0.012205234	-0.012463254
28	-0.018181035	-0.010521564	-0.017537129	-0.017425854	-0.015938427

Tabela 0.14

Perda de massa % durante ensaio de retração					
Dias	C1 a/b0,36 SP1,6	C1 FC1 a/b0,3 SP2	C1V1a/b0,385SP2	C1 M1 a/b0,50 SP2	C1 T1 a/b0,395 SP2
0	0	0	0	0	0
7	1.76%	5.02%	4.20%	5.20%	3.31%
14	3.02%	7.43%	7.33%	11.64%	7.17%
21	4.16%	8.65%	8.72%	13.85%	9.32%
28	4.74%	9.19%	9.31%	14.92%	10.51%

Tabela 0.15 - Capilaridade

Mistura	Provete	Lado	1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura	4ª leitura	5ª leitura	C	Cmédio	DP	CV(%)
			Início	10min	30min	60min	90min	(Kg/(m ² *min ^{0,5}))			
C1 a/b0,36 SP1,6	1	a	229.9	232.9	234.3	236.2	237.6	0.47	0.527	0.04	8.4
		b	234.8	237.6	239	241.1	242.7	0.51			
	3	a	254.3	257.4	259.4	261.2	263.1	0.57			
		b	217.1	219.9	221.6	223.9	225.7	0.58			
	4	a	226.7	230.2	231.8	233.5	235.1	0.49			
		b	232.2	236.1	237.9	239.8	241.5	0.54			
C1 FC1 a/b0,3 SP2	7	a	207.4	213.4	216.5	219.6	222.4	0.9	0.848	0.05	6.0
		b	194.5	200.4	203	206.4	209.6	0.92			
	8	a	213.8	219.4	222	224.9	227.5	0.81			
		b	188.8	194.2	196.6	199.5	202.1	0.79			
	9	a	213.6	219.3	222.1	225	227.6	0.83			
		b	196.8	203	205.7	208.8	211.4	0.84			
C1V1a/b0 ,385SP2	2	a	203	207.2	209.2	211	212.9	0.57	0.615	0.14	22.9
		b	179	184.8	187.4	189.6	191.6	0.68			
	3	a	193.3	198.1	201.1	204.1	206.2	0.81			
		b	189.6	194.3	196.9	199.4	201.3	0.7			
	4	a	179	182.9	184.3	185.6	187.2	0.43			
		b	193.5	199.1	200.7	202.5	204.1	0.5			
C1 M1 a/b0,50 SP2	7	a	148.8	154.1	156.6	158.8	161.3	0.72	0.713	0.11	15.5
		b	136.1	141.9	144.7	147.2	149.7	0.78			
	8	a	113.3	118.6	121	123.2	125.3	0.67			
		b	166.6	171.8	173.4	175.4	177.2	0.54			
	9	a	140.3	145.9	148.4	150.7	152.9	0.7			
		b	155.9	161.5	164.5	167.7	170.2	0.87			
C1 T1 a/b0,395 SP2	4	a	158.3	164.4	167.1	169.8	172.5	0.81	0.802	0.12	14.5
		b	190.2	198.1	201.4	204.5	207.4	0.93			
	5	a	168.1	174.6	177.3	179.9	182.5	0.79			
		b	185.3	190.9	193.4	196.1	199	0.81			
	6	a	169	174.8	177.1	179.2	180.7	0.59			
		b	172.9	178.8	182.2	185.1	187.6	0.88			

Tabela 0.16 - Segregação quando endurecido

CFC			CV			CM			CT		
h	hi	%	H	hi	%	h	hi	%	h	hi	%
350	190	54%	310	150	48%	310	100	32%	320	120	38%
350	175	50%	315	235	75%	290	110	38%	330	130	39%
360	240	67%	330	210	64%	320	110	34%	340	135	40%
Média		57%	Média		62%	Média		35%	Média		39%
DP		9%	DP		13%	DP		3%	DP		1%

ANEXO B

Resultados da equação de Herschel -Bulkey

Modelo

$$Y=a+b*x^c$$

$$Y= \tau ; a= \tau_y; b=\eta; x=\dot{\gamma}; c=n$$

Onde:

τ (N.mm) ; τ_y (N.mm) ; η (N.mm/s); $\dot{\gamma}$ (s^{-1}); n (adimensional)

Metacauino				
C1 M1 a/b0,5 SP2				
	15	30	45	60
a	9.40E-02	0.229612	0.220876	0.272459
b	7.41E-03	5.65E-03	5.07E-03	4.58E-03
c	1.486845	1.529303	1.548908	1.556889
Fíler Calcário				
C1 FC1 a/b0,3 SP2				
	15	30	45	60
a	0.230203	0.247266	0.266775	0.153859
b	9.92E-03	8.46E-03	9.73E-03	9.32E-03
c	1.487986	1.513896	1.477676	1.480135
Biomassa				
C1 B1 a/b0,75 SP2,5				
	15	30	45	60
a	0.438822	0.518143	0.563233	0.436423
b	9.92E-02	4.06E-02	0.030525	3.38E-02
c	1.109818	1.264126	1.305048	1.284528

Cimento				
C1 a/b0,36 SP1,6				
	15	30	45	60
a	0.246039	0.157793	0.158245	0.173218
b	9.72E-03	1.07E-02	1.13E-02	1.26E-02
c	1.474712	1.445777	1.425713	1.398276
Pó Cerâmico				
C1 T1 a/b0,395 SP2				
	15	30	45	60
a	3.53E-02	0.423679	0.251899	0.197526
b	1.75E-02	5.64E-03	5.60E-03	6.84E-03
c	1.393195	1.605052	1.593048	1.548016
Pó de Vidro				
C1 V1 a/b0,385 SP2				
	15	30	45	60
a	0.153054	0.17149	9.01E-02	0.121559
b	6.42E-03	5.90E-03	7.34E-03	6.24E-03
c	1.514323	1.515669	1.456836	1.483725

Resultados (perfil de variação de velocidade em rampa)

Cimento	
C1 a/b,36 SP1,6	
a	0.335045
b	1.11E-02
c	1.468284
Pó cerâmico	
C1 T1 a/b,395 SP2	
a	0.215364
b	1.00E-02
c	1.540072
Pó de vidro	
C1 V1 a/b,385 SP2	
a	0.117742
b	9.43E-03
c	1.479169

Metacaulino	
C1 M1 a/b,5 SP2	
a	0.144703
b	7.24E-03
c	1.524957
Fíler calcário	
C1 FC1 a/b,3 SP2	
a	0.347172
b	9.26E-03
c	1.525521
Biomassa	
C1 B1 a/b,75 SP2,5	
a	2.168097
b	6.18E-02
c	1.243723

Gráficos reômetro viskomat nt

