



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Argamassas de alvenaria à base de aglomerante hidróxido de cálcio-sílica: estudo de desenvolvimento

Andreia Liliana Dantas Costa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Luiz António Pereira Oliveira

Covilhã, Junho de 2014

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais.

Agradecimentos

Os meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, possibilitaram a realização deste trabalho.

Ao Professor Luiz Oliveira, pela sua orientação e partilha de conhecimento, pela sua disponibilidade e acompanhamento científico. Pelo apoio, esclarecimento e confiança transmitidos durante o período de realização.

À Universidade da Beira Interior pela minha formação académica, pelo conhecimento que adquiri e pela disponibilização dos recursos necessários à realização deste trabalho.

Ao senhor Albino e Félix que sempre estiveram disponíveis para me ajudar em qualquer altura.

Aos meus amigos, pelo apoio demonstrado, tanto no período de execução desta dissertação, como ao longo de todo o curso, em especial à Carina e ao Abílio.

Ao Tiago que foi o meu suporte durante a realização deste trabalho.

Em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram incondicionalmente, nos bons e nos maus momentos, agradeço por serem quem são.

Resumo

Atualmente, a indústria de construção civil tem vindo a preocupar-se com a reutilização e reaproveitamento de certos resíduos urbanos ou industriais, de maneira a valorizar os mesmos, tendo sempre em consideração o factor económico. Um dos resíduos com grande potencial de valorização são os cascos e os recipientes de vidro. Tratando-se de um material rico em sílica, no estado amorfo, este tem demonstrado possuir reactividade pozolânica. Esta dissertação tem como objectivo desenvolver misturas de vidro e hidróxido de cálcio (cal hidratada) que resultem na formação de compostos hidráulicos. A experimentação será iniciada pela caracterização dos materiais, seguida da optimização das proporções das misturas binárias (Cal/vidro) em forma de pasta. Com base nessa optimização, serão propostas composições de argamassas de alvenaria, cujas propriedades no estado fresco e endurecido serão avaliadas em laboratório. Espera-se, com este trabalho, definir a composição óptima da mistura binária e definir as características das argamassas de alvenaria que possam atender alguns critérios definidos nas recomendações ou normas vigentes.

Palavras-chave

Argamassas, reatividade pozolânica, cal hidratada, resíduo de vidro.

Abstract

Currently, the construction industry has been concerned with the reuse and recycling of certain urban and industrial waste, in order to valorize them, always taking into consideration the economic factor. One of the wastes with great appreciation potential is the hulls and glass containers. Since this material is rich in silica, in the amorphous state, it has been shown to have pozzolanic reactivity. This dissertation aims the developing of glass mixtures and calcium hydroxide (hydrated whitewash) which result in hydraulic compounds. The experimentation will be initiated by the characterization of the materials, followed by the optimization of the proportions of binary mixtures (whitewash/glass) in paste form. Based on this optimization, will be proposed masonry mortars compositions, whose properties in fresh and hardened state will be evaluated in laboratory. Is expected, with this work, to define the optimum composition of the binary mixture and defining characteristics of masonry mortars that can meet certain criteria defined in the recommendations or current regulations.

Keywords

Mortars, pozzolanic reactivity, whitewash, glass waste.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento teórico	1
1.2 Objetivos do tema proposto	1
1.3 Organização da dissertação	2
2. As Argamassas de Alvenaria	3
2.1 Introdução	3
2.2 Argamassas de Revestimento	4
2.3 Constituintes das argamassas	5
2.3.1 Aglomerantes	5
2.3.1.1 Cal Aérea	5
2.3.1.2 Cimento	5
2.3.1.3 Cal hidráulica	6
2.3.2 Agregados	6
2.3.2.1 Areia	6
2.3.3 Água de amassadura	7
2.4 Propriedades exigidas às argamassas de revestimento	7
2.5 Argamassas com incorporação de vidro	8
2.6 Comportamento reológico das argamassas	9
3. Materiais Pozolânicos	13
3.1 Introdução	13
3.2 Classificação das pozolanas	13
3.2.1 Materiais Pozolânicos Naturais	13
3.2.2 Materiais Pozolânicos Artificiais	14
3.2.2.1 Vidro	14
3.3 Reação pozolânica	14
3.3.1 Matéria-prima: Hidróxido de Cálcio (cal aérea)	15
3.3.2 Silicatos de cálcio hidratado (C-S-H)	15
4. Análise Experimental	17
4.1 Programa experimental	17
4.2 Caracterização dos materiais	17
4.2.1 Pó de vidro	17
4.2.2 Cal hidratada	18
4.2.3 Cimento	19
4.2.4 Areia	20
4.2.5. Água de amassadura	21
4.3 Preparação das pastas cal/vidro	21
4.3.1 Equipamento	21
4.3.2 Procedimento laboratorial	22
4.3.3 Ensaio realizados nas pastas	22
4.3.3.1 Ensaio no estado fresco – Reologia	22
4.3.3.2 Ensaio no estado endurecido – DRX e ATG	23
4.3.3.2.1 Difração de raios X - DRX	23
4.3.3.2.2 Análise termogravimétrica – ATG	24
4.4 Preparação das argamassas	24
4.4.1 Argamassas no estado fresco	25
4.4.1.1 Determinação da consistência por espalhamento	25
4.4.1.2 Determinação da retenção de água	26

4.4.1.5 Determinação das propriedades reológicas das argamassas	29
4.4.1.6 Preparação dos corpos de prova	30
4.4.2 Argamassas no estado endurecido.....	30
4.4.2.1 Resistência mecânica à flexão e à compressão	30
4.4.2.2 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	32
4.4.2.3 Determinação da absorção de água por capilaridade	33
5. Apresentação e discussão dos resultados	37
5.1 Introdução.....	37
5.2 Propriedades das pastas	37
5.2.1 Em estado fresco - Comportamento reológico das pastas.....	37
5.2.2 No estado endurecido	41
5.2.2.1 Difração de raios X – DRX.....	41
5.2.2.2 Análise termogravimétrica – ATG	45
5.3 Propriedades das argamassas	50
5.3.1 No estado fresco	50
5.3.1.1 Consistência por espalhamento	50
5.3.1.2 Determinação da retenção de água.....	50
5.3.1.2 Determinação da massa volúmica	51
5.3.1.2 Determinação da consistência pelo método de penetração	51
5.3.1.3 Determinação das propriedades reológicas das argamassas	52
5.3.2 No estado endurecido	56
5.3.2.1 Resistência mecânica à flexão e à compressão	56
5.3.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico.....	59
5.3.2.3 Determinação da absorção de água por capilaridade	60
5.3.2.4 Resistência de aderência à tração	62
6. Conclusões e propostas futuras	65
6.1 Conclusões	65
6.2 Propostas futuras	66
Referências Bibliográficas	67

Lista de Figuras

Figura 2.1	1-Fluido newtoniano; 2-Fluido de bingham; 3-Fluido pseudoplástico; 4- Fluido dilatante	10
Figura 2	Relações entre a tensão de corte e o gradiente de velocidade (FERRARIS 1999)	11
Figura 3	Granulometria do vidro abaixo dos 125 μm	18
Figura 4	Granulometrias de 63 μm , 125 μm e 250 μm	18
Figura 5	Curva granulométrica da cal hidratada	19
Figura 6	Misturadora de pá	21
Figura 7	Reómetro Viskomat NT	22
Figura 8	Perfil Velocidade em Rampa	23
Figura 9	Difratómetro	24
Figura 10	Análise termogravimétrica	24

Lista de Tabelas

Lista de Acrónimos

[1linha de intervalo]

LNEC Laboratório Nacional de Engenharia Civil

EN Norma Europeia

NP Norma Portuguesa

DRX Difração de Raios-X

ATG Análise termogravítica

...

1. Introdução

1.1 Enquadramento teórico

Actualmente, a indústria da construção civil é um dos sectores que provoca maiores resíduos industriais e, por isso, tem sido motivo de preocupação em diversos países. Em função disso, para diminuir as consequências negativas desta indústria, podem ser tomadas várias medidas, entre as quais a reciclagem e reutilização de resíduos urbanos e ou industriais.

Um dos resíduos com grande potencial é o vidro, uma vez que, tratando-se de uma material rico em sílica no estado amorfo, tem demonstrado possuir reactividade pozolânica. No entanto, este resíduo pode ser constituído de componente em argamassas de revestimento.

Os revestimentos têm grande relevância na durabilidade de uma construção devido ao papel protector das alvenarias. Contudo, é importante referir que a compatibilidade entre os materiais em que são executadas as alvenarias e as argamassas de revestimento, é relevante para a aplicação de obras de conservação e restauro.

Inicialmente, as argamassas de revestimento eram produzidas com cal, tanto aérea como hidráulica, até ao aparecimento do cimento - este com maior resistência mecânica superior e baixo tempo de presa, fazendo com que o uso da cal caísse em desuso. No entanto, as argamassas de cimento têm-se mostrado demasiado rígidas para funcionarem como argamassas de revestimento em edifícios antigos. Neste âmbito, as argamassas de reabilitação apontam para a necessidade de evitar a utilização de cimento Portland, uma vez que as mesmas são pouco permeáveis ao vapor de água e apresentam um elevado módulo de elasticidade, que é incapaz de acomodar as deformações das alvenarias [1]. Neste caso, as argamassas de cal com adições pozolânicas (vidro) constituem uma interessante possibilidade de aplicação.

Com a apresentação desta dissertação, procura-se incrementar o uso de cal aérea na formulação de argamassas de revestimento.

1.2 Objetivos do tema proposto

O presente estudo tem como objetivo desenvolver um aglomerante para argamassas de revestimento de alvenarias. Este aglomerante será produto da otimização de um aglomerante aéreo (hidróxido de cálcio) e de uma fonte de sílica amorfa proveniente de resíduo sólido urbano e industrial. Além de um breve estado da arte sobre aglomerantes e argamassas para alvenaria, o trabalho tem uma campanha experimental que envolve ensaios normalizados

para argamassas de alvenaria e um estudo reológico da mesma. Pretende-se a substituição integral do cimento Portland nas argamassas de revestimento em estudo.

1.3 Organização da dissertação

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

A primeira parte inclui a dedicatória, os agradecimentos, o resumo analítico com as respectivas palavras-chave, índice, lista de figuras, listas de quadros e lista de acrónimos.

A parte textual inclui o Capítulo 1, onde é apresentado o enquadramento do tema, sendo igualmente traçados os objetivos do presente trabalho, para além de se descrever a organização do trabalho.

O capítulo 2 é relativo a uma análise bibliográfica onde é apresentado as características das argamassas de revestimento e os seus constituintes, dando ênfase as argamassas com incorporação de vidro.

O capítulo 3 continuará a ser uma análise bibliográfica mais centrada nas pozolanas e as suas características.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia adotada na fase experimental do presente estudo, no qual são expostos os materiais utilizados nas argamassas, assim como a descrição dos métodos experimentais e respetivos procedimentos.

No capítulo 5, apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos na caracterização dos materiais utilizados, assim como das argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões do estudo experimental, demonstrando a viabilidade da aplicação deste tipo de argamassa.

Da parte referencial, apresentam-se as referências bibliográficas citadas neste trabalho e os anexos.

2. As Argamassas de Alvenaria

2.1 Introdução

As argamassas são uma mistura de agregados finos ligados por um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos. Os agregados existem em grande percentagem, tendo por isso uma influência muito importante nas características das argamassas. O recurso a ligantes hidrófilos, como é o caso da cal aérea, obriga a que as argamassas com eles produzidos incluam água como constituinte [2].

As primeiras argamassas conhecidas foram descobertas na Galileia, atual estado de Israel, com mais de 10 000 anos de existência. Desde de então o seu uso tem sido alargado, utilizando cal aérea e gesso como ligantes [3].

No antigo Egipto e Médio Oriente usava-se gesso impuro como material ligante na construção de monumentos. A cal calcinada teria sido depois usada por Gregos e Romanos que durante séculos foi o ligante mais utilizado. Posteriormente, descobriu-se que a calcinação de rochas para a produção de cal que contivessem uma certa percentagem de argila podia fornecer maior resistência ao produto final e um certo carácter hidráulico.

Mais tarde, os Romanos utilizaram um material de cor escura existente nos arredores da bacia de Nápoles, chamada “pozzolana”, nome que vinha de Pozzuoli (localidade próxima da cidade). Este material revelou que ao ser adicionado a argamassa de cal proporcionava um carácter hidráulico bastante forte, uma presa rápida e uma impermeabilidade bastante boa para ser usada como reboco exterior. O nome de pozzolana foi então estendido a outros tipos de aditivos com propriedades semelhantes, como pó ou fragmentos de tijolo e de algumas cerâmicas ou cinzas vulcânicas, que foram usados quer como ligantes, quer como agregado quando em fragmentos de maior dimensão. Estes materiais tem em comum uma grande percentagem de silicatos e aluminatos, que sozinhos não apresentam carácter ligante, mas que na presença de humidade e à temperatura ambiente reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentíceas que confere elevada resistência e durabilidade à argamassa final [4][5][6].

No século XIX o ritmo da construção cresceu rapidamente, e procurava-se materiais que adquirissem boas propriedades físicas e mecânicas. Em 1824, o inglês Joseph Aspdin regista a patente do processo de fabrico de um ligante hidráulico à base de uma mistura de calcário e argila. Este processo baseia na calcinação de pedra calcária com 20% a 30 % de argila, mas com temperaturas superiores para obtenção da cal. O produto resultante dessa calcinação

tinha uma cor semelhante à das pedras da ilha Portland, nome que ficaria ligado ao conhecido cimento Portland. Desde então várias alterações e novas tecnologias foram introduzidas até se obter o cimento Portland tal como hoje o conhecemos, passando a ser o ligante preferencial, substituindo a cal (hidratada e hidráulica) [6], [7].

Durante o século XX, a conservação de edifícios de alvenaria foi efetuada tendencialmente com argamassas de cimento. Contudo, a incompatibilidade destas argamassas com os edifícios antigos é visível devido à presença de elevada quantidade de sais solúveis. Esta incompatibilidade nas argamassas de cimento com os edifícios antigos deve-se também à sua menor permeabilidade relativamente às argamassas de cal, retendo o excesso de água. As argamassas de cimento possuem uma elevada resistência à compressão, não acompanhando as estruturas de alvenaria aquando da ocorrência de deformações ou efeitos causados pelas diferenças de temperaturas [8],[10].

Devido a este problema veio um crescente interesse pelas propriedades das pozolanas naturais e artificiais, com vista à conservação e restauro de edifícios antigos. Este interesse surge na sequência de diversos estudos que defendem a importância de garantir a compatibilidade entre os materiais existentes nas construções e os novos materiais a utilizar [6].

Na presente dissertação será focado o estudo para argamassas de revestimento.

2.2 Argamassas de Revestimento

Na construção os revestimentos e acabamentos são a primeira camada de proteção dos edifícios, face às ações agressivas da natureza química e mecânica. Para garantir um bom desempenho das argamassas de revestimento há que garantir que se adequam onde são aplicadas, ou seja, terem resistência mecânica, serem deformáveis, terem impermeabilidade suficiente e um bom comportamento aos sais [11], [12].

O funcionamento das paredes antigas é diferente do usado atualmente. Uma dessas diferenças está relacionado com a proteção da humidade, uma vez que nas paredes recentes são concebidas para evitar a entrada de humidade (materiais impermeáveis), as paredes antigas permitem a entrada da humidade por serem constituídas por matérias porosas.

Na reabilitação de um edifício antigo, sempre que possível, manter os materiais, caso não seja possível, substituí-los por outros compatíveis com o suporte. Desta maneira, previne-se a criação de novas patologias e mais significativas do que a que se estava a retificar [13].

2.3 Constituintes das argamassas

2.3.1 Aglomerantes

Os aglomerantes são materiais que têm a capacidade de aglutinar partículas e que funcionam como elementos ativos no estabelecimento da ligação entre os vários componentes das argamassas [14].

Os aglomerantes podem ser classificados com hidráulicos, aéreos, betuminosos ou poliméricos [15].

Os ligantes hidráulicos tem a capacidade de fazer presa, endurecer e manter as suas propriedades ao longo do tempo quer em contacto com o ar quer em presença de água. Enquanto os ligantes aéreos são aqueles que só fazem presa e permanecem mecanicamente resistentes em contacto com o ar [16].

Esta capacidade de desenvolver o processo de endurecimento e manter ou não as suas propriedades dentro de água é condicionada pelo índice de hidraulicidade das matérias-primas utilizadas para a produção dos ligantes, sendo o teor de argila um fator determinante. A hidraulicidade do ligante, por conseguinte a capacidade de desenvolver presa e endurecer em presença de água é função deste índice de hidraulicidade [17].

2.3.1.1 Cal Aérea

A matéria-prima da cal aérea é o calcário puro, com mais de 95% de carbonato de cálcio ou carbonato de cálcio e magnésio. A cozedura de calcário puro dá origem ao óxido de cálcio, que constitui a cal aérea, a cozedura de calcário margoso dá origem às cais mais ou menos hidráulicas conforme o teor de argila. A sílica, os óxidos de ferro e alumínio são as impurezas mais frequentes na constituição de rochas carbonatadas. As cais resultantes de rochas carbonatadas puras e quase puras não possuem propriedades hidráulicas, sendo que, por este motivo não endurecem na presença de água.

As cais aéreas podem ser designadas de cais cálcicas (Cl), que são sobretudo constituídas por óxido de cálcio (CaO) ou cais dolomítica (DL) constituída sobretudo por óxido de cálcio e óxido de magnésio [18].

2.3.1.2 Cimento

O cimento Portland artificial resulta da mistura devidamente proporcionada de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) como outros constituintes ricos em sílica, alumina ou ferro. Estes elementos são sujeitos a altas temperaturas que iram reagir entre si, passando por diversos fenómenos químicos e físicos, donde surge o clínquer após um arrefecimento rápido à saída do forno. O clínquer é depois moído e são-lhe acrescentadas adições que dão origem aos diversos tipos de cimentos [19].

O índice de hidraulicidade deste composto é superior ao da cal hidráulica, resultando em menores tempos de presa e endurecimentos, aumentando assim as resistências do material endurecido [19].

2.3.1.3 Cal hidráulica

A cal hidráulica é obtida pelo mesmo processo que de fabrico que a cal hidrata. As cals hidráulicas provem de calcários impuros, com teores de argila de 5% a 20%. Quando tratados a temperaturas entre os 800°C e os 1500°C, além de se formar óxido de cálcio, há combinação da sílica e alumina da argila com esse óxido de cálcio em quantidades significativas. Quanto maior for a temperatura menor é a quantidade de óxido de cálcio livre e maior é a quantidade de silicatos e aluminatos de cálcio, podendo-se obter um produto semelhante ao obtido no fabrico do cimento. A cal na construção

A cal retirada do forno tem que ser extinta para a eliminação da cal viva e para provocar a pulverização de toda a cal hidráulica. Na extinção deve apenas adicionar-se a água estritamente necessária para hidratar a cal viva, uma vez que os silicatos e aluminatos também reagem com a água e o seu excesso pode provocar reação, conferindo presa. A cal na construção

2.3.2 Agregados

Os agregados podem ser classificados tendo em conta a sua origem, a dimensão das partículas e a sua massa volúmica. Deste modo, podemos ter agregados naturais ou artificiais, grossos ou finos, leves ou de elevada massa volúmica.

A utilização de agregados com granulometria adequada contribui para o incremento da resistência mecânica e durabilidade das argamassas [14].

2.3.2.1 Areia

A areia é um agregado de origem natural, composto por partículas finas e granuladas, sem participação química na argamassa. Esta é utilizada com o objetivo de diminuir a retração e a quantidade de ligante, aumentando assim a compactidade e a resistência à compressão.

A escolha do tipo de areia e a sua composição tem uma grande importância no comportamento das argamassas. A granulometria das areias deve ser contínua e bem equilibrada, isto é, deve ser constituída por grãos de várias dimensões, mas sem excesso de grãos muito finos ou muitos grossos, de modo a conferir uma melhor compactidade e trabalhabilidade às argamassas.

A granulometria como a forma das partículas devem ser adequadas à utilização prevista para a argamassa, uma vez que estas propriedades podem influenciar a porosidade das argamassas.

Quanto mais uniforme for a granulometria da areia, menor será o seu teor em água e de ligante, aspecto este que favorece para a ocorrência de menor retração [2].

2.3.3 Água de amassadura

A água é um dos elementos principais para promover as reações de hidratação, desencadeando as propriedades aglutinantes do ligante.

A dosagem de água a utilizar deve ser a necessária para garantir boa trabalhabilidade, de modo a evitar um excesso de porosidade e retração, causando perdas de resistência mecânica, condicionam a consistência, o processo de endurecimento, a aderência ao suporte e a qualidade final dos revestimentos.

A água a utilizar nas argamassas deve encontrar-se limpa e isenta de impurezas especialmente sais, para não comprometer as argamassas a uma degradação aceleradas.

2.4 Propriedades exigidas às argamassas de revestimento

As argamassas de revestimento devem apresentar determinadas características que lhes permita assegurar um adequado desempenho das suas funções, tais como: trabalhabilidade, resistência à fissuração, capacidade de impermeabilização em zona não-fissurada, permeabilidade ao vapor de água, aderência ao suporte, resistência aos choques e durabilidade

Uma argamassa para ser facilmente aplicada e proporcionar uma boa aderência ao suporte, deverá ter uma boa trabalhabilidade. A trabalhabilidade de uma argamassa pode ser melhorada através de várias formas, entre as quais se destacam o aumento do teor de finos das areias usadas, aumento do teor de cimento e aumento da quantidade de água de amassadura. Para além da composição da mistura, geralmente a relação água/cimento é responsável pelo controlo da trabalhabilidade da argamassa, ou seja um aumento da relação água/ligante corresponde a uma melhor trabalhabilidade. Contudo, durante o processo de secagem, quanto maior for a quantidade de água perdida por evaporação, maior será a retração e perda de volume associada a este fenómeno [21].

Sendo as argamassas um componente poroso, a água pode penetrar por capilaridade ou permeabilidade, dependendo da dimensão dos poros. A água infiltrada através de fissuras das argamassas ou nos diversos acabamentos, não é necessária para o processo de hidratação, deve evapora-se logo que as condições atmosféricas o permitam. Contudo, a argamassa não deve ser excessivamente impermeável de modo a não existir trocas de vapor de água com o exterior. Ou seja, esta deve permitir que a parede possa respirar decorrendo das atividades no interior [22].

A resistência mecânica das argamassas está associada ao seu módulo de elasticidade e condiciona diretamente a trabalhabilidade e a resistência à deformação das argamassas de revestimento [22].

O bom desempenho de uma argamassa de revestimento é fundamental que esta esteja bem aderente ao suporte. Uma boa aderência é primordial para garantir as funções de impermeabilização do revestimento, condicionando também a resistência à fendilhação, nomeadamente a distribuição de tensões na argamassa, geradas por movimentos diferenciais em relação ao suporte [22].

A durabilidade das argamassas esta relacionada com os aspetos anteriormente referidos. Sempre que as argamassas deixam de responder a um dos critérios, considera-se que alcançou o termo da sua vida útil.

2.5 Argamassas com incorporação de vidro

Atualmente a indústria da construção civil e vidreira são dos sectores que provocam maiores resíduos industriais, por isso, tem sido motivo de preocupação. Em função disso, para diminuir as consequências negativas desta indústria, podem ser tomadas várias medidas, entre as quais a reciclagem e reutilização de resíduos urbanos e ou industriais. Resíduos reciclados /incorporação de resíduos

O vidro é constituído por uma mistura de diferentes silicatos obtidos por fusão de óxidos ou dos seus derivados, tendo como elemento principal a sílica ou o óxido de silício (SiO_2). Trata-se de uma substancia mineral, amorfa e fisicamente homogénea, com potencial reativo, ou seja, apresenta na sua estrutura sílica suscetível de se combinar com os hidróxidos de cálcio do cimento ou da cal [20].

Por isso vários estudos tem sido feitos nesse sentido, segundo Fragata et al teve como objetivo a promoção da reutilização de resíduos industriais em argamassa com ligante de cal aérea em substituição de parte do ligante. Concluiu que através da adição de resíduos de vidro mas argamassa de cal aérea obtém aumento das resistências à flexão e à compressão.

Outros autores, oliveira referem que apenas 40% dos vidros são reciclados, dentre estes os vidros coloridos. Também verifica que além do vidro outro resíduo que não é reciclado e de cerâmica vermelha, resultante do processo de fabrico ou de obras de construção civil. Concluiu através de realização de ensaios de argamassas verificou que é possível a fabricação de materiais pozolânicos a partir de resíduos e de cerâmica vermelha.

Sendo o vidro uma material pozolânico típico, uma vez que apresenta em estado amorfo constituintes como a sílica, sódio e o cálcio, composição esta favorável ao desenvolvimento da reação pozolânicas [1].

2.6 Comportamento reológico das argamassas

A reologia (Rheos O fluir, logos = estudo) é 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. O comportamento reológico dos materiais representa-se assim pela relação entre o fluxo e as forças a que são submetidos [45].

Segundo Paiva, o fluxo está relacionado com o movimento das camadas adjacentes dos elementos do fluido, ou seja, quando se aplicada uma força de corte a um fluido, um gradiente de velocidade é induzido sobre ele. Ao facto de proporcionalidade entre a força e o gradiente de velocidade denomina-se 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 conforme se segue,

$$\tau = F/A = \eta \cdot \gamma$$

Onde:

τ é a tensão de corte

F é a força de corte

A a área do plano paralelo à força

η é a viscosidade

γ é a taxa de deformação.

No caso da reologia de suspensões, as partículas sólidas no meio de um fluido perturbam as linhas de fluxo aumentando a resistência do sistema ao escoamento, ou seja elevando a viscosidade. As características reológicas das suspensões são afetadas por diversos fatores, tais como: a concentração volúmica de sólidos, as características do meio líquido, a temperatura, o tempo decorrido desde o início da mistura, as características físicas das partículas e do tipo de interação das partículas com o meio

Os fluidos são divididos em Newtonianos e não-Newtonianos, a diferença entre eles é que nos fluidos Newtonianos apresentam viscosidade constante, enquanto os não-Newtonianos têm viscosidade variando com a taxa de deformação e com o tempo. Na figura seguinte são apresentados os principais tipos de fluidos. [45]

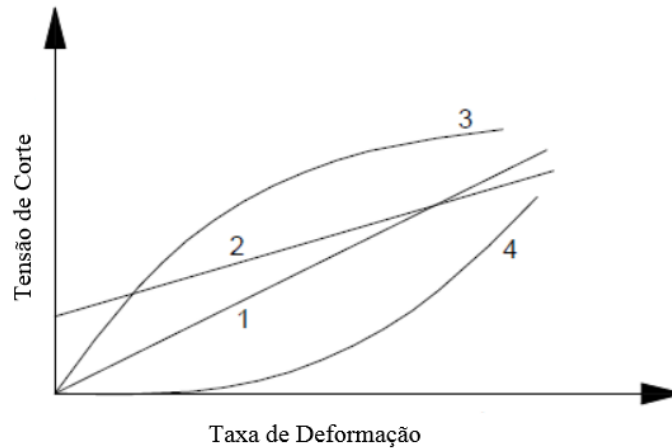


Figura 1 - 1-Fluido newtoniano; 2-Fluido de bingham; 3-Fluido pseudoplástico; 4- Fluido dilatante

Nos fluidos newtonianos, devido ao facto de a relação entre a tensão de corte e a taxa de deformação dar origem a uma reta que passa pela origem do gráfico e ao facto da viscosidade ser constante, a medição da deformação para uma única velocidade de corte é suficiente para o caracterizar, ou seja, basta a viscosidade para avaliar as propriedades reológicas do fluido.

Os fluidos não-newtonianos apresentam um comportamento mais complexo, são característicos os fluidos Binghamianos ou viscoplásticos, fluidos pseudoplásticos e fluidos dilatantes.

As argamassas apresentam um comportamento não-newtoniano, sendo que o modelo mais utilizado para descrever o comportamento reológico é o modelo de Bingham devido à possibilidade de medir dois parâmetros independentes e porque o comportamento reológico é traduzido satisfatoriamente recorrendo a uma relação linear.

Os fluidos Binghamianos são caracterizados pela existência de um valor residual para a tensão de corte, o qual deve ser excedido para que o material tenha fluxo viscoso. Esta tensão é conhecida como tensão limite de escoamento. A expressão seguinte descreve o fluido de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$$

Onde:

τ - Tensão de corte

τ_0 - Tensão limite de escoamento

η_p - Viscosidade plástica

$\dot{\gamma}$ - Taxa de deformação

O fluido de Herschel-Buckley, também chamado de fluido de Bingham generalizado explica os fluidos com concentrações de partículas mais elevadas, isto é necessita de uma tensão inicial para começar a escoar, mas esta relação entre a taxa de corte e a taxa de deformação não é linear tal como mostra a equação seguinte:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$$

Onde K é um índice de consistência do fluido relacionado à viscosidade aparente e n um índice de potência que determina a não linearidade da relação da tensão de corte com a taxa de deformação.

Quando se trata de descrever o comportamento de suspensões concentradas, entendidas com uma suspensão de partículas sólidas num estado viscoso, pode-se ter dois tipos de expressões. Um relaciona a concentração da suspensão com a viscosidade e a tensão de corte em função do gradiente de velocidade, assumindo que a viscosidade do sistema é constante, conforme é apresentado na imagem seguinte.

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	$\dot{\gamma} = \alpha\tau^2 + \beta\tau + \sigma$

Figura 2 - Relações entre a tensão de corte e o gradiente de velocidade (FERRARIS 1999)

Contudo os fluidos não dependem só da tensão de corte, taxa de deformação e viscosidade. Os fluidos não-newtonianos dependentes do tempo são aqueles que a relação entre a taxa de deformação e a tensão aplicada depende do tempo em que o fluido é agitado ou permanece em repouso. Estes materiais poderão ser definidos como tixotrópicos ou reotrópicos. O comportamento mais observado para argamassas é o comportamento tixotrópico.

Considera-se um fluido é tixotrópico quando existe um decréscimo de viscosidade ao longo do tempo sob determinada velocidade de corte, ou seja quando as partículas estão sujeitas a

uma determinada agitação e são separadas das suas matérias-primas, acompanha-se de uma redução da resistência ao fluxo, após a retirada a agitação verifica uma aglomeração e um aumento da resistência ao fluxo. Se isto acontecer estamos perante um fluido tixotrópico.

3. Materiais Pozolânicos

3.1 Introdução

Segundo a norma ASTM C593-95 [23] as pozolanas são definidas como materiais siliciosos que possuem poucas propriedades cimentícias, mas que na presença de umidade reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar composto com propriedades aglomerantes [24]. Tal como foi referido anteriormente o vidro (sílica) é uma pozolana.

Segundo [24] citando [25] a principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

As pozolanas podem ser utilizadas de duas formas: como substituição parcial do cimento ou como adição em teores variáveis em relação à massa ou volume de mesmo [24]. No estudo de desenvolvimento apresentado irá-se substituir totalmente o cimento.

3.2 Classificação das pozolanas

As pozolanas são divididas em duas categorias: pozolanas naturais e pozolanas artificiais. As pozolanas naturais tem origem vulcânicas e sedimentar e as artificiais são materiais resultantes de processos/resíduos industriais com base siliciosa [26].

Pela norma ASTM C618-01 [27] divide as pozolanas em três classes distintas: Classe N, Classe F e Classe C. A classe N engloba pozolanas naturais (calcinadas ou não) tais como terra diatomáceas, argilas calcinadas e materiais siliciosos. As classes F e C são referentes a cinzas volantes, sendo que a classe C engloba cinzas produzidas a partir de lignite e a classe F cinzas produzidas a partir de antracite queimada e carvão.

A obtenção da sílica para o desenvolvimento do trabalho apresentado, foi resultante da recolha de garrafas de vidro, portanto trata-se de um material pozolânico artificial.

3.2.1 Materiais Pozolânicos Naturais

As pozolanas naturais podem ser divididas por origem vulcânica ou sedimentar, tendo por base um elevado teor em sílica amorfa.

As pozolanas naturais de origem vulcânica tem existência em locais onde existe ou existiu atividade eruptiva, sendo um material abundante e preferencialmente utilizado no fabrico de cimento pozolânicos [24], [26].

3.2.2 Materiais Pozolânicos Artificiais

Os materiais pozolânicos artificiais tem origem na calcinação de materiais naturais provenientes de subprodutos industriais. O grande desenvolvimento da aplicação destes materiais resulta na necessidade de aproveitamento dos resíduos industriais que iriam poluir o ambiente.

3.2.2.1 Vidro

O vidro é constituído por uma mistura de diferentes silicatos obtidos por fusão de óxidos ou dos seus derivados, tendo como elemento principal a sílica ou o óxido de silício (SiO_2). Trata-se de uma substância mineral, amorfa e fisicamente homogénea, com potencial reativo. Uma vez que, apresenta na sua estrutura sílica suscetível de se combinar com os hidróxidos de cálcio do cimento ou da cal [20].

Todavia, é importante determinar a relação do tamanho da partícula de vidro para não se obter valores de expansão excessiva. Ou seja, com a otimização do tamanho das partículas, é possível obter-se materiais com efeitos pozolânicos a partir da reciclagem do vidro. Segundo Oliveira et al demonstra que os resíduos de vidro quando utilizados com dimensões entre $75\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$ não apresentam expansão excessiva em corpos de prova de argamassa [20], [28].

Segundo [29] realizaram a caracterização do vidro provenientes da indústria e ensaiaram com diversos graus de moagem relativamente à sua reatividade pozolânica, concluindo positivamente à sua utilização. Na tabela seguinte é apresentado os compostos do vidro.

Tabela 3.1 : Caracterização de resíduos de vidro (%)

Composição química	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
Vidro	72.5	0.16	0.2	9.18	3.65	13.2	0.12	0.39

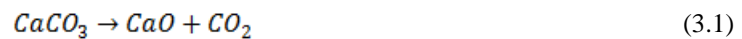
3.3 Reação pozolânica

Reação pozolânica é a reação química de uma dado material, mais conhecido por pozolana, e o hidróxido de cálcio na presença de água, formando composto hidráulicos. A existência desta reação permite classificar os materiais como pozolânicos e a sua extensão determinar a reatividade pozolânica do material [26].

Em seguida será descrito a reação pozolânica e os seus intervenientes para o estudo de desenvolvimento desta dissertação.

3.3.1 Matéria-prima: Hidróxido de Cálcio (cal aérea)

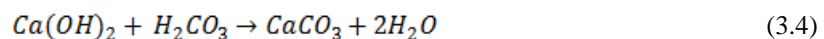
Como foi dito anteriormente, para obtenção da cal aérea resulta da cozedura da rocha calcária (calcite), contendo também dolomite, sílica e óxido de ferro. O processo de obtenção Para a produção da cal (CaCO_3) da rocha de origem passa por um processo de calcinação, no qual o dióxido de carbono é libertado resultando o óxido de cálcio ou cal viva (CO_2) [24], [30], [31].



O óxido de cálcio reage em contacto com a água transformando em hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), resultando em cal hidratada ou pasta de cal, dependendo da quantidade de água disponível durante a reação exotérmica. A este processo chama-se “apagar a cal” [30].



A cal aérea ocorre durante o processo de carbonatação do hidróxido de cálcio (também chamado por portlandite) com o dióxido de carbono CO_2 dissolvido em água (em argamassa ou humidade) para formar carbonato de cálcio (descritas nas equações 3.3 e 3.4), resultando numa resistência mecânica adicional [4] [14].



O processo de carbonatação tem uma importância fundamental para a obtenção de argamassas mais resistentes. Este processo é influenciado por diversos fatores tais como a humidade, a permeabilidade da argamassa, a concentração de dióxido de carbono, estrutura porosa e espessura da argamassa [32].

Contudo nem todo o hidróxido de cálcio é convertido em carbonato de cálcio, seja devido a condições atmosféricas desfavoráveis, permeabilidade reduzida ou espessuras demasiado elevadas da argamassa.

Quando o hidróxido de cálcio não é transformado, pode contribuir para um crescimento da resistência mecânica, porém se a quantidade de portlandite for elevada a argamassa acaba por enfraquecer [4] [10].

3.3.2 Silicatos de cálcio hidratado (C-S-H)

Os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) são provenientes da hidratação do cimento Portland e da cal hidratada quando existe água, contudo é de salientar que existem diversos tipos de C-S-H, tendo em conta as condições nas quais são formados, as suas estruturas cristalinas e as suas propriedades. Porém, o grau de cristalinidade destes produtos é geralmente baixo, uma

vez que para a formação de produtos cristalinos são necessárias condições de pressão e temperaturas superiores às do meio ambiente. O produto de reação, além da sua ocorrência como C-S-H, pode ser encontrado como formação natural como tobermorites e wollastonites [33].

Como tobermorite, existe a formação de duas fases semi-cristalinas, C-S-H tipo I e tipo II. O C-S-H do tipo I é caracterizados por um rácio Ca/Si $<1,5$ e apresenta-se em forma de favos. O segundo tipo tem um rácio Ca/Si $\geq 1,5$ e a sua morfologia é fibrosa. Todavia é difícil reconhecer o tipo de C-S-H formado nas reações pozolânicas. Contudo, pode-se dizer que em todas as reações pozolânicas existe a formação de silicatos de cálcio hidratados.

Diversos autores [33], [34], afirmam que a existência de silicatos de cálcio hidratado, aumentam as propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

4. Análise Experimental

4.1 Programa experimental

Neste capítulo será abordado a descrição e a metodologia adotada na realização desta dissertação. O estudo experimental será desenvolvido em argamassas com diferentes percentagens de cal/vidro com o objetivo de se verificar o seu comportamento pozolânico como substituto de agregado fino de origem natural. Uma vez que, o objetivo principal do estudo é a otimização de um aglomerante aéreo (hidróxido de cálcio) e de uma fonte de sílica amorfa, e da capacidade resistente em argamassas de revestimento com incorporação destes materiais.

A parte experimental está organizada em 3 partes, sendo que a primeira foi a realização de pastas cal/vidro em diferentes percentagens, tais como: Cal 50% Vidro 50%, Cal 60% Vidro 40%, Cal 75% Vidro 25% e Cal 85% Vidro 15%. Posteriormente a escolha da argamassa de referência com traço 1:1:6 e a relação de água/cimento de 0,90. A relação água/cimento foi escolhida tendo em consideração a determinação da consistência da argamassa segundo a norma BS EN 1015-3:1999. Esta argamassa foi produzida com cimento Portland CEM II 32,5 N, areia amarela de rio e água. Por último, a substituição do cimento Portland pelas diferentes percentagens Cal/Vidro em argamassa. Esta última com um traço 1:3 e a relação de água/aglomerantes variando conforme a percentagem de aglomerantes para obtenção de uma consistência igual à argamassa de referência.

4.2 Caracterização dos materiais

4.2.1 Pó de vidro

O vidro utilizado foi recolhido em diversos estabelecimentos, não sendo a cor do vidro um critério de escolha. Posteriormente, procedeu-se ao estudo das propriedades físicas.

De seguida, para proceder aos ensaios foi necessário obter as diferentes granulometrias do material, para tal, foi utilizado a máquina de abrasão Los Angeles, para a obtenção de menor tamanho de partículas. O material resultante da moagem foi peneirado nos peneiros de 63 a 125 μ m.

Para a caracterização deste material utilizou-se o ensaio de Danaher/Beckman Coulter, para saber a superfície específica do aglomerado e obter uma melhor otimização vidro/cal. Este ensaio foi realizado para granulometrias de 63 μ m, 125 μ m e 250 μ m, sendo que a granulometria de 125 μ m apresenta uma área específica de 3169cm²/g., conforme é apresentado nas figuras 4.1 e 4.2.

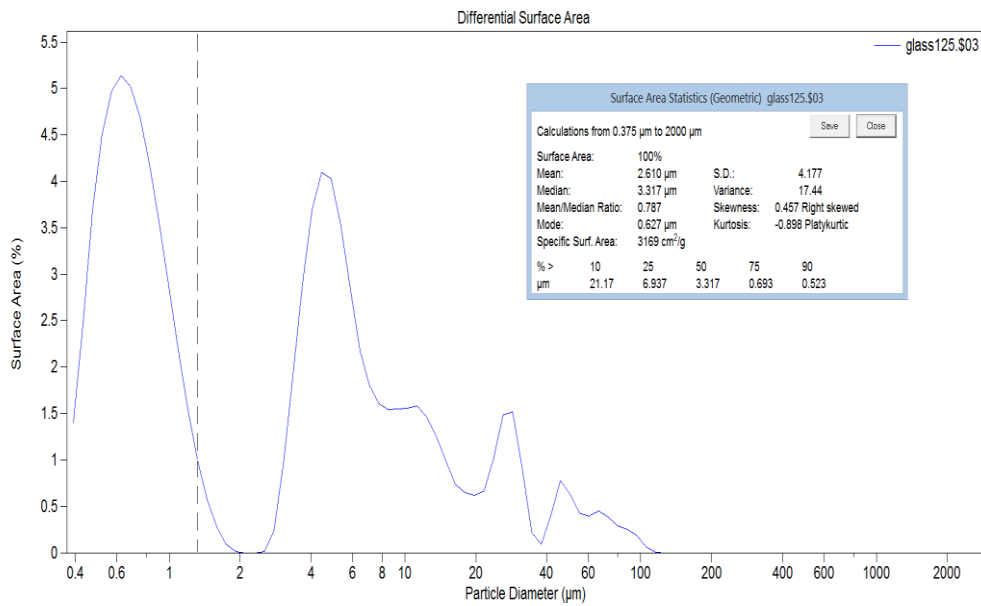


Figura 3 - Granulometria do vidro abaixo dos 125 µm

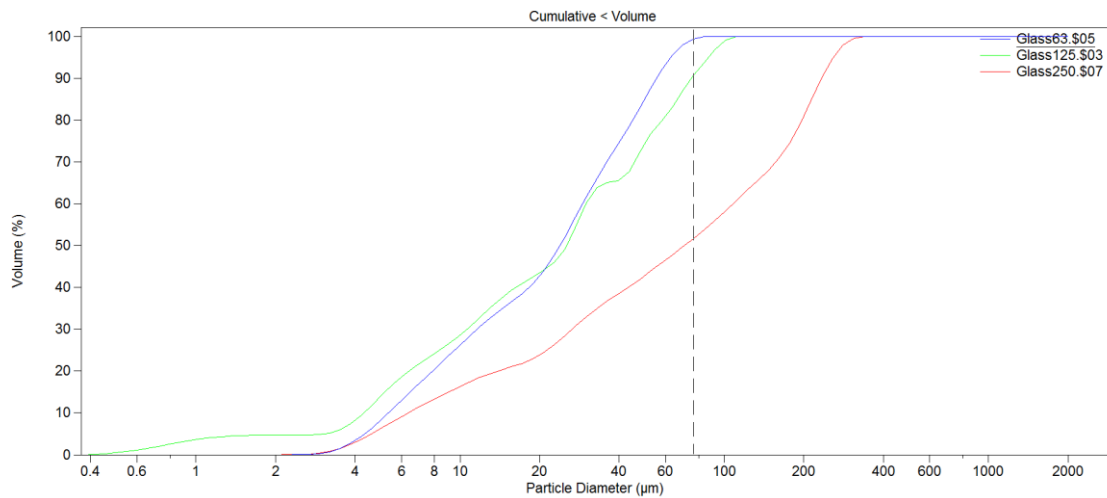


Figura 4 - Granulometrias de 63µm, 125µm e 250µm

4.2.2 Cal hidratada

A cal hidratada escolhida foi a CL80, já existente no laboratório. Esta cal possui uma massa volúmica de 2310 Kg/m³. A distribuição granulométrica já se encontrava analisada, tal como é observada na Figura 4.1.

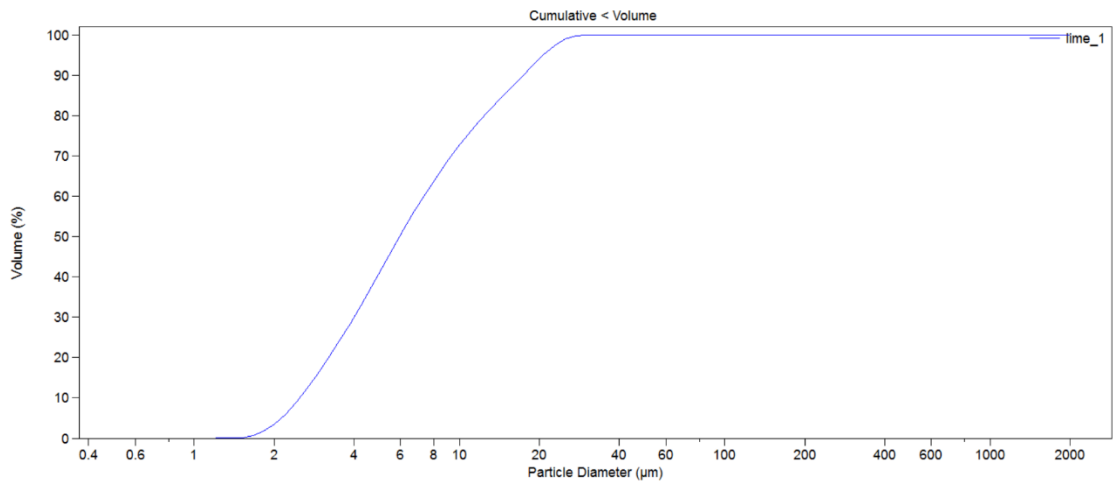


Figura 5 - Curva granulométrica da cal hidratada

4.2.3 Cimento

Utilizou-se cimento Portland (CEM II/B-L), de classe de resistência 32,5N, certificado de acordo com a norma NP EN 197-1/2011. O cimento utilizado foi da marca SECIL e as suas características encontram-se na Tabela 4.1, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 4.1. Constituintes presentes no cimento

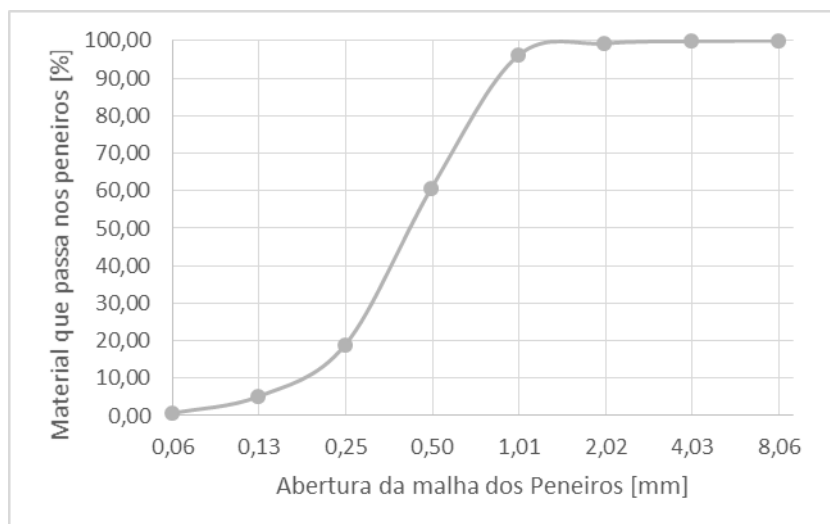
Constituintes	Teor
Clínquer Portland	65% a 79%
Calcário	21% a 35%
Outros constituintes	≤ 5%
Constituintes químicos (%)	
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	≤ 3,5%
Teor de Cloretos	≤ 0,10%
Características Mecânicas	
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	≥ 16
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	32,5 a 52,5
Características Físicas	
Princípio de Presa	≥ 75min
Expansibilidade	≤ 10mm

4.2.4 Areia

A análise granulométrica da areia é realizada segundo a EN1015-1 [35] . A areia usada na composição de argamassas foi uma areia amarela.

Tabela 4.2. Granulometria das areias naturais

Abertura da malha mm]	Percentagem de Passados	
	Passados (%)	Retidos (%)
8,00	99,99	0,01
4,00	99,90	0,10
2,00	99,31	0,69
1,000	96,04	3,96
0,500	60,67	39,33
0,250	18,79	81,21
0,125	5,13	94,87
0,063	0,68	99,32
Resíduos	0,00	100,00
Módulo de Finura	2.2	



4.2.5. Água de amassadura

A água utilizada para o procedimento foi água potável da rede pública de abastecimento, em conformidade com a norma NP EN 1008:2003 [36].

4.3 Preparação das pastas cal/vidro

4.3.1 Equipamento

Na preparação das pastas de cal/vidro utilizou-se como equipamento de mistura mecânica o misturador de pá, representado na figura 4.5.



Figura 4.5. Misturadora de pá

A pesagem dos constituintes da pasta foi efetuada numa balança digital com uma precisão de 0,1g.

A quantidade de material utilizado na realização das pastas é apresentada na seguinte tabela 4.3.

Tabela 4.3. Quantidade de cal/vidro nas diferentes pastas.

	Cal (g)	Vidro (g)	Água (g)
C85%V15%	425	75	479,8
C75%V25%	375	125	479,8
C60%V40%	300	200	479,8
C50%V50%	250	250	479,8

4.3.2 Procedimento laboratorial

As pastas foram produzidas com diferentes percentagens de cal/vidro, utilizando sempre a mesma quantidade de água. A preparação das pastas foi efetuada do seguinte modo:

1. Pesagem da cal e do vidro em diferentes percentagens e da água;
2. De seguida, mistura-se a cal com o vidro e coloca-se dentro do recipiente;
3. Posteriormente, coloca-se a água de forma a obter uma mistura homogénea;
4. Liga-se o misturador a uma velocidade lenta (140 ± 5 r.p.m) durante um minuto;
5. Efetua-se uma paragem de 30 segundos. Nesta pausa é retirada a pasta acumulada nos bordos e fundo do recipiente;
6. Por fim, mistura-se mais 30 segundos em velocidade rápida (285 ± 10 r.p.m).

Após este procedimento, efetuou-se a moldagem de corpos de prova com dimensões 40x40x40 mm. Colocou-se os corpos de prova na camara de cura a uma temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa superior a 90%. Após 5 dias, os corpos de prova foram desmoldados e continuaram na estufa até perfazer os 28 e 63 dias de cura.

4.3.3 Ensaio realizados nas pastas

4.3.3.1 Ensaio no estado fresco - Reologia

O comportamento reológico das pastas foi estudado através do reómetro Viskomat NT (Fig. 4.3). Para a realização deste, colocou-se a pasta num recipiente cilíndrico e escolheu-se a pá especial para pastas/caldas. De seguida, escolheu-se o perfil de velocidade mais adequado a este tipo de material.



Figura 4.6. Reómetro Viskomat NT

O ensaio foi realizado com o intuito de avaliar as propriedades reológicas dos fluidos - neste caso, das pastas de cal/vidro. Foram, assim, determinados parâmetros como a viscosidade e a tensão de cedência.

O perfil realizado para as pastas foi o perfil em rampa, é um perfil onde a velocidade varia de 0 a 160 rpm. Este perfil permite conhecer a influência do tempo de trabalho de mistura na tensão de cedência e viscosidade plástica relativa.

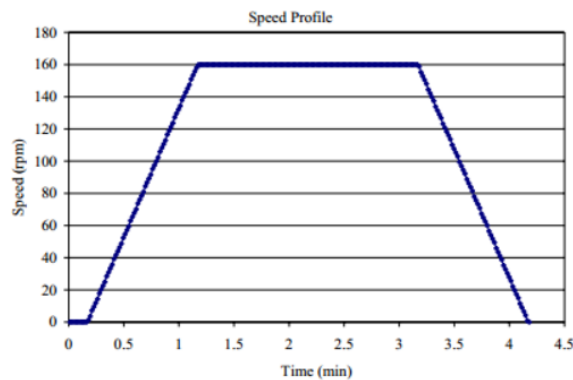


Figura 4.7. Perfil Velocidade em Rampa

4.3.3.2 Ensaio no estado endurecido - DRX e ATG

Os ensaios realizados foram efetuados para amostras de 28 e 63 dias de cura. Para a realização deste ensaio, foi necessário a preparação prévia das amostras. Primeiro as amostras foram secas a uma temperatura de $65\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 3 dias. Posteriormente realizou-se a peneiração das amostras secas com uma granulometria abaixo dos $63\ \mu\text{m}$.

4.3.3.2.1 Difração de raios X - DRX

A difração de raio-X (DRX) permite a identificação das fases cristalinas presentes na amostra analisada. Através da incidência, na amostra pulverizada de raios X e da sua difração pelos cristais, é possível obter um difractograma onde se podem ler os registos pertencentes aos diversos materiais cristalinos que compõem a pasta. No estudo de caso, o que se pretende é a verificação de reações entre o hidróxido de cálcio e a sílica. A realização deste ensaio foi efetuada no Centro de Ótica da Universidade da Beira Interior.



Figura 4.8 Difratómetro

4.3.3.2.2 Análise termogravimétrica - ATG

A análise termogravimétrica obtém-se um termograma contínuo da variação de massa de um material em função da temperatura. Neste ensaio, são registadas as variações mais ou menos acentuadas correspondentes a alterações químicas no material, como a oxidação, a carbonatação ou a hidratação. A uma determinada temperatura, pode ocorrer a dissociação térmica de um dos compostos (ou seja, é possível determinar se - e quando - esta substância esteve presente na amostra).



Figura 4.9. Análise termogravimétrica

4.4 Preparação das argamassas

Os pressupostos e procedimentos utilizados na produção das argamassas tiveram por base as indicações presentes nas normas EN 1015-1 e EN 1015-2 [35], [37]. A produção de argamassas iniciou-se pela recolha de quantidades suficiente de material para posterior pesagem das amostras. Após preparação das quantidades de água e produto em pó necessários à amassadura, procedeu-se à introdução da água no balde da misturadora e, em seguida foi adicionada a argamassa seca com os devidos cuidados para evitar perdas de material.

Inicialmente, a mistura decorre aproximadamente 30 segundos em velocidade lenta (140 ± 5 r.p.m), promovendo a correta homogeneização da mistura, sem que ocorram perdas de material. Após este período, a mistura procede numa velocidade rápida (285 ± 5 r.p.m) durante aproximadamente 1 minuto. Findo este período, efetua-se uma paragem de 15 segundos para a retirada da argamassa acumulada na pá e nos bordos do recipiente.

Na preparação da argamassa de referência, a diferença das restantes é o traço utilizado 1:1:6 e os seus constituintes, sendo cimento Portland, cal hidratada e areia respetivamente. Esta argamassa indicou-nos a razão água/aglomerados ($A/AG=0,90$) para obter uma consistência de 180 ± 10 mm. Contudo esta razão água/aglomerantes não foi constante para todas as argamassas, conforme se aumentava a quantidade de cal a razão aumentava também como se pode ver na tabela a seguir.

Tabela 4.4. Quantidades dos materiais constituintes das argamassas.

Argamassas	Traço	Razão W/MC	Cimento (g)	Vidro (g)	Cal (g)	Areia (g)	Agua (g)	Total (g)
Referencia	01:01:06	0,9	387,6	0	387,6	2325,6	697,7	3798,4
C50 V50	01:03	0,95	0	590,8	295,4	1772,5	561,3	3220
C60 V40	02:03	1	0	578,7	347,2	1736,1	578,7	3240,6
C75 V25	03:03	1,1	0	556,2	417,1	1668,5	611,8	3253,6
C85 V15	04:03	1,15	0	545,4	463,6	1636,2	627,2	3272,4

4.4.1 Argamassas no estado fresco

4.4.1.1 Determinação da consistência por espalhamento

A realização deste ensaio tem como objetivo avaliar a consistência de uma argamassa no estado fresco, através da medição da sua deformação devido a uma ação mecânica exterior. O ensaio foi conduzido segundo a norma EN 1015-3:1999 [38].

Este ensaio mede o espalhamento da argamassa no estado fresco, segundo o seguinte procedimento: inicialmente, coloca-se a argamassa no molde compactando-a com 10 pancadas, em seguida volta-se a colocar argamassa no molde compactando-a novamente com 10 pancadas. Retira-se o molde e roda-se a alavanca 15 voltas (± 1 volta por segundo) e mede-se o espalhamento obtido, figura 4.10.

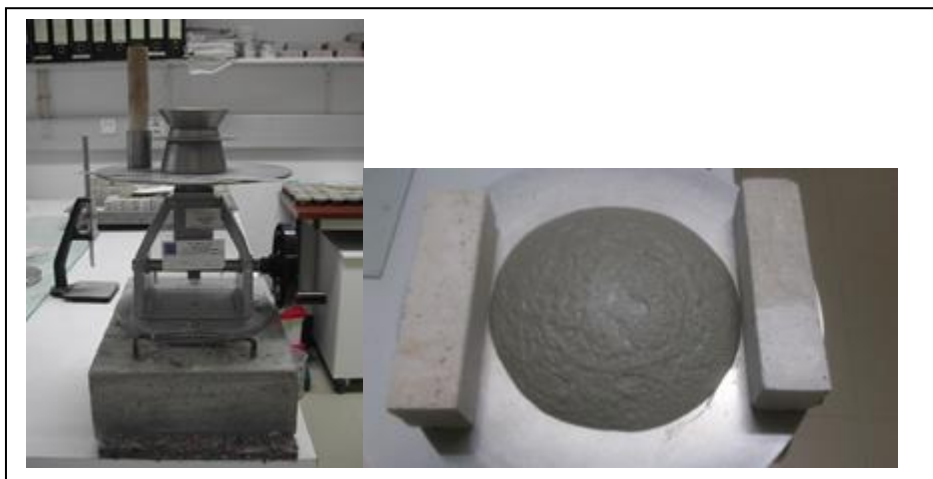


Figura 4.10 Ensaio da mesa de espalhamento "Flow-Table"

4.4.1.2 Determinação da retenção de água

A capacidade de retenção de água foi avaliada por base o disposto na norma EN 1015-8:1999 [39].

Para a realização deste ensaio recorreu-se a:

- Molde cónico rígido (com aproximadamente 10 cm de diâmetro e 2,5 cm de profundidade);
- Gaze e peso de 2Kg;
- Papel de filtro;
- Balança de precisão de 0,1g.

O ensaio inicia-se com a pesagem do molde (m_1), e das folhas de papel de filtro (m_2). De seguida, utilizando uma espátula, preenche-se o molde até extravasar, procedendo-se posteriormente ao nivelamento pelo topo, seguindo-se a pesagem do conjunto (m_3). Em seguida, cobre-se a totalidade do molde com uma gaze, por cima da qual são aplicados os filtros. Relativamente à gaze, refere-se apenas que a sua aplicação destina-se a impedir o aumento do peso dos filtros por via da aderência de partículas de argamassa, evitando-se desta forma a contabilização destas partículas como sendo peso de água absorvida pelos filtros. Logo após o conjunto se encontrar posicionado, ele é invertido sobre uma superfície não absorvente. O conjunto é comprimido por recurso a um peso de 2Kg durante 5 minutos, decorridos estes, é retirado o peso e recoloca-se o molde na posição inicial, pesando de seguida o peso dos filtros (m_4).

Para a determinação da retenção de água de uma determinada argamassa (WRV), usa-se a equação (6), sendo necessário determinar as expressões intermédias que se seguem:

A água total contida numa determinada argamassa, W_1 , é dada por:

$$W_1 = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{argamassa}}} [g/g] \quad (4.1)$$

em que: $m_{\text{água}}$ = massa de água utilizada na preparação da argamassa total [g];

$m_{\text{argamassa}}$ = massa de argamassa [g];

A quantidade de água da argamassa introduzida no molde (W_2), é obtida pela seguinte expressão

$$W_2 = m_5 \times W_1 [g] \quad (4.1)$$

Sendo, m_5 - quantidade de argamassa dentro do molde, obtida por:

$$m_5 = m_3 - m_1 [g] \quad (4.2)$$

no mesmo seguimento, a quantidade de água absorvida pelo conjunto dos papéis de filtros (W_3) é determinada, pela expressão:

$$W_3 = m_4 - m_2 [g] \quad (4.3)$$

Nos casos em que esta quantidade excede os 10g, deverão ser repetidos os procedimentos indicados anteriormente, aumento o número de papéis de filtro.

A perda relativa de água pela argamassa, expressa em percentagem é dada por:

$$W_4 = \frac{W_3}{W_2} \times 100 [\%] \quad (4.4)$$

Finalmente, a retenção de água (WRV) de uma determinada argamassa é dada por:

$$WRV = 100 - W_4 [\%] \quad (4.5)$$

Este ensaio avalia de forma rápida a massa volúmica aparente de uma argamassa no estado fresco, efetuando-se para tal o quociente entre a massa de uma amostra e o volume por ela ocupado. A metodologia adotada para a realização deste ensaio foi adotada pela norma EN 1015-6:1999.

Os materiais utilizados na realização do ensaio, foram (Fig 4.11): recipiente de massa (m_1) e capacidade conhecidas (V); régua metálica para rasar a superfície e colher de pedreiro; balança com precisão de 0,1g. O ensaio inicia-se com a determinação prévia da massa e capacidade do recipiente. Em seguida, recorrendo a uma colher de pedreiro, enche-se o recipiente numa primeira camada até cerca de metade da sua capacidade e efetua-se a sua compactação, aplicando 10 pancadas. Posteriormente, o recipiente é cheio um pouco além da sua capacidade e procede-se novamente à compactação. Finalmente, executa-se a remoção da argamassa de excesso, rasando o recipiente com auxílio da régua metálica.



Figura 4.11 Determinação da massa volúmica

Tendo em conta, $M_{argamassa} = m_2 - m_1$ e $V_{argamassa} = V_{recipiente}$, procedeu-se à determinação da massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco (ρ), pela seguinte fórmula:

$$\rho_{argamassa} = \frac{m_2 - m_1}{V} [KG/m^3] \quad (4.6)$$

em que: m_1 - massa do recipiente [KG];

m_2 - massa do conjunto (recipiente com argamassa) [KG];

V - volume do recipiente [m^3].

4.4.1.4 Determinação da consistência pelo êmbolo de penetração

Este ensaio ajuda a determinar a consistência de argamassas, utilizando o êmbolo de penetração. O valor de penetração do êmbolo é medido pela penetração vertical deixado cair livremente através de uma dada altura da argamassa. O ensaio foi conduzido segundo a norma EN 1015-4:1998 [40].



Figura 4.12. Êmbolo de penetração

4.4.1.5 Determinação das propriedades reológicas das argamassas

O comportamento reológico das argamassas foi estudado através do reômetro Viskomat NT (Fig.4.12). Todos os procedimentos estão igualmente descritos na realização das pastas. Contudo, no estudo de argamassas o perfil adotado foi o “step”, em que a velocidade de rotação é ajustada para alterar com o tempo, variando de 20 em 20 rpm, passando de um valor inicial de zero a 160 rpm e invertendo em seguida o percurso. Este perfil permite identificar a magnitude tixotrópica das argamassas através das áreas de histerese, formadas pelas curvas ascendentes e descendentes, conhecendo assim os valores de tensão de cedência e viscosidade plástica relativas.

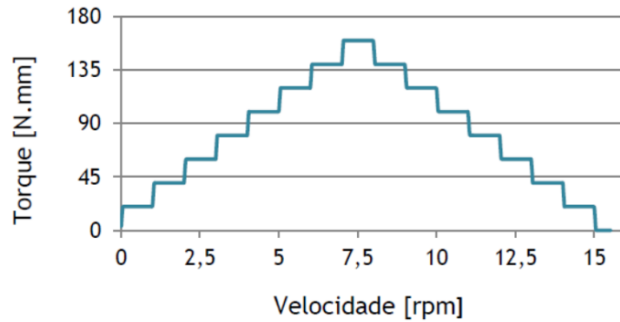


Figura 4.13. Perfil “Step”

4.4.1.6 Preparação dos corpos de prova

Após concluídos os ensaios no estado fresco, procedeu-se ao molde dos provetes para ensaios no estado endurecido. Foram moldados para cada argamassa 9 corpos de prova prismáticos de dimensões 40 x 40 x 180 mm³. Estes corpos de prova serviram para determinar a resistência à flexão e compressão, determinação do módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de capilaridade. Também foi realizados ensaios de resistência à tração, através da aplicação de uma cama de argamassa com 2,0 cm de espessura na superfície de tijolos. Os moldes prismáticos foram previamente limpos e oleados, para posteriormente serem preenchidos com argamassa e compactada com recurso a um processo mecânico. Em seguida, a superfície foi alisada e os moldes colocados numa camara de cura a uma temperatura de 18° ± 2°C e a uma humidade relativa de 90% ± 5%. Passados 7 dias de cura os corpos de prova foram desmoldados e novamente colocados na camara ate perfazer os 28 e 63 dias respetivamente.

4.4.2 Argamassas no estado endurecido

A caracterização no estado endurecido foi efetuado para todas as argamassas aos 28 e 63 dias de idade.

4.4.2.1 Resistência mecânica à flexão e à compressão

Para a execução destes ensaios, baseou-se em procedimentos adotados da EN 1015-11:1999 [41]. A realização destes ensaios recorreu-se a uma máquina de ensaio (figu.SSS) que, dispondo de duas prensas, permite a execução do ensaio de flexão e de compressão. Na realização deste ensaio teve-se de colocar uma célula de carga, uma vez que são argamassas ditas bastardas, não se conseguiria obter resultados.

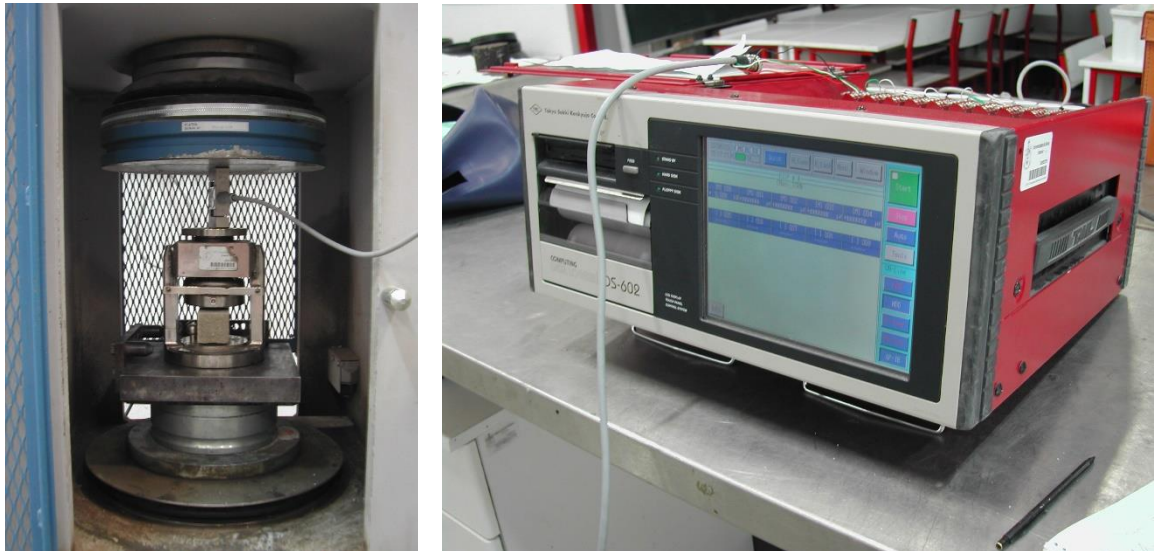


Figura 4.14. Ensaio de resistência à flexão e compressão

Para a avaliação da resistência à flexão, os corpos de prova são posicionados de forma centrada relativamente ao ponto de aplicação da força e perpendicular aos apoios em cada uma das extremidades. Posteriormente, procedeu-se à aplicação de uma força a taxa constante, até registar o valor de pico correspondente à força de rotura do provete.

A avaliação da resistência à compressão é efetuada nos meios corpos de prova resultantes do ensaio de flexão. Procedeu-se ao seu posicionamento, centrado o provete no prato inferior da máquina. De seguida, é acionado o movimento descendente do prato superior até ao contacto com o provete. Finalmente, aplica-se uma força a taxa constante, até a rotura do provete.

A caracterização da resistência à compressão e à flexão das argamassas foi efetuado com base em 3 corpos de prova de cada tipo de argamassa. A determinação das tensões de rotura à flexão e compressão, teve por base as seguintes expressões:

Tensão de rotura à flexão

$$\sigma_{flexão} = 1,5 \times \frac{F_{máx} \times L}{bd^2} [MPa] \quad (4.7)$$

Em que: $F_{máx}$ - força de rotura à flexão [MPa];

L - distância entre os apoios cilíndricos [mm];

B - largura do prisma [mm];

d - espessura do prisma [mm].

Tensão de rotura à compressão:

$$\sigma_{compress\tilde{a}o} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_c} [MPa] \quad (4.8)$$

Em que: $F_{m\acute{a}x}$ - força de rotura à compressão [MPa];

A_c - área de aplicação de carga [$40 \times 40\text{mm}^2$].

4.4.2.2 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

A velocidade de propagação de ultra-sons corresponde ao quociente entre a distância percorrida pela onda e o tempo que ela levou a percorrer a distância entre transdutores e que é registado pelo equipamento. Através da velocidade de propagação de ultra-sons consegue-se calcular o módulo de elasticidade dinâmico. Os valores obtidos permitem analisar as características internas dos materiais nomeadamente no que se refere à presença de fendilhação de vazios, resistência mecânica, homogeneidade e porosidade. Deste modo, argamassas com formulações semelhantes que apresentem velocidades de propagação superiores apresentarão uma estrutura interna mais compacta, coesa, com menor existência de vazios e fissuras comparativamente com outra argamassa de composição semelhante que apresente velocidade de propagação inferior. No estudo de caso, aplicou-se o ensaio direto em corpos de prova prismáticos.

Para a realização correta do aparelho de medição do tempo de propagação de ondas ultra-sons, o primeiro passo passa pela calibração, utilizando para tal uma barra de calibração. Posteriormente, cada um dos transdutores é colocado num dos topos apostos do provete, aplicando previamente massa de contacto entre estas duas superfícies, de forma a compensar irregularidades, melhorando por esta via a transmissão de onda. Efetuam-se três leituras para cada um dos corpos de prova, do tempo de propagação das ondas ao longo do comprimento do provete [42].



Figura 4. Erro! Não existe nenhum texto com o estilo especificado no documento. -15. Ultra sons. Pela Norma BS 1881 consegue-se converter o módulo de elasticidade provenientes da fórmula $v=(E/P)^{0.5}$, para o módulo de elasticidade do material.

$$Ed = v^2 \times \rho \times \frac{(1 + \mu) \times (1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (4.9)$$

Em que: Ed - Modulo de elasticidade (MPa)

ρ - Densidade (Kg/m³)

v - Velocidade de propagação (Km/s)

μ - Coeficiente de poisson

4.4.2.3 Determinação da absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade baseou-se na norma EN 1015-18:2002 [43].

Este ensaio consiste na avaliação da evolução da quantidade de água absorvida por capilaridade por unidade de área, em intervalos de tempo definido por unidade de área, em intervalos de tempo definidos.

Para a realização deste ensaio foram necessários os seguintes instrumentos e equipamentos: estufa ventilada a temperatura constante de $60 \pm 5^\circ\text{C}$, excicador, tabuleiro metálico com varetas de plástico para suporte dos corpos de prova, balança, pipeta para manutenção do nível de água a valores constantes e régua para medição da franja capilar e pano húmido para limpar o excesso de água no provete.

Os corpos de prova foram inicialmente secos na estufa a temperatura constante, até a sua massa atingir valor constante. Findo este período, os corpos de prova são condicionados em

excitador durante 24 horas, possibilitando-lhes o seu correto arrefecimento. Posteriormente, procede-se à marcação das faces laterais com o objetivo de manter constante a espessura (0,2mm) dos corpos de prova imersos em água. De seguida, regista-se a massa inicial dos corpos de prova (m_1), colocando-se de seguida sobre as varetas de plástico. Por último, utilizando a pipeta, procede-se ao enchimento do tabuleiro até as marcações nos corpos de prova. Imediatamente em seguida, aciona-se o cronómetro e coloca-se sobre o conjunto uma campânula, para evitar a evaporação. Decorridos 10 minutos de ensaio, retira-se o provete retirando com um pano húmido a água em excesso e pesa-se. Repete-se o mesmo procedimento para os seguintes instantes: 30min, 60min e 90min.



Figura 4.16. Ensaio de absorção de água por capilaridade

Segundo a norma o coeficiente de capilaridade é calculado pela seguinte fórmula

$$C = 0,1 \times (M_2 - M_1) [Kg/(m^2 \times min^{0,5})] \quad (4.10)$$

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

M_2 - massa do provete no instante 90 min [g];

M_1 - massa do provete no instante 10 min [g].

4.4.2.3 Resistência da aderência por tração

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 1015-12:2000 [44], para a realização do ensaio adotou-se tijolos cerâmicos.

Para se avaliar a aderência da argamassa ao suporte, usa-se uma metodologia que permite determinar a força necessária para provocar o arrancamento, por tração, de uma área de argamassa aplicada sobre um suporte.

5. Apresentação e discussão dos resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, de forma a caracterizar as pastas de cal/vidro e as argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

Inicialmente apresentam-se e discutem-se os resultados sobre o comportamento reológico de pastas de cal/vidro com diferentes relações cal/vidro, seguido dos resultados da análise termogravimétrica e da difração de raio-x para as diferentes idades, de 28 e 63 dias. Finalmente, apresentam-se e são discutidos os resultados dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido das argamassas para os tempos de cura de 28 e 63 dias.

5.2 Propriedades das pastas

5.2.1 Em estado fresco - Comportamento reológico das pastas

Analisando os resultados de torque e velocidade obtidos pelo reómetro e dispostos em gráficos nos quais se observa, sobretudo, os relacionados ao regime descendente de velocidade, conclui-se que os comportamentos reológicos das pastas em estudo ajustam-se ao modelo de Bingham.

Na Figura 5.1. apresenta-se a curva de torque vs. velocidade para a pasta C50V50 nos regimes ascendente e descendente de velocidade. Observa-se aqui alguns distúrbios na evolução do torque na forma de altos e baixos, onde a cada mudança de velocidade um fenómeno de “breakdown” se reproduz. Este comportamento anómalo merece uma observação mais aprofundada no sentido de tentar discernir a causa. Entretanto, este distúrbio pode ser causado tanto pelo procedimento de ensaio ou pela interação entre as percentagens de vidro e cal. Para eliminar a causa procedimento o ensaio foi repetido e tendo sido observado a mesma anomalia. Conclui-se portanto que a interação possa ser outra pista viável. Não obstante, o observador pode recorrer ao refinamento eliminando os valores absurdos, sobretudo aqueles que se encontram no princípio de cada mudança significativa de velocidade.

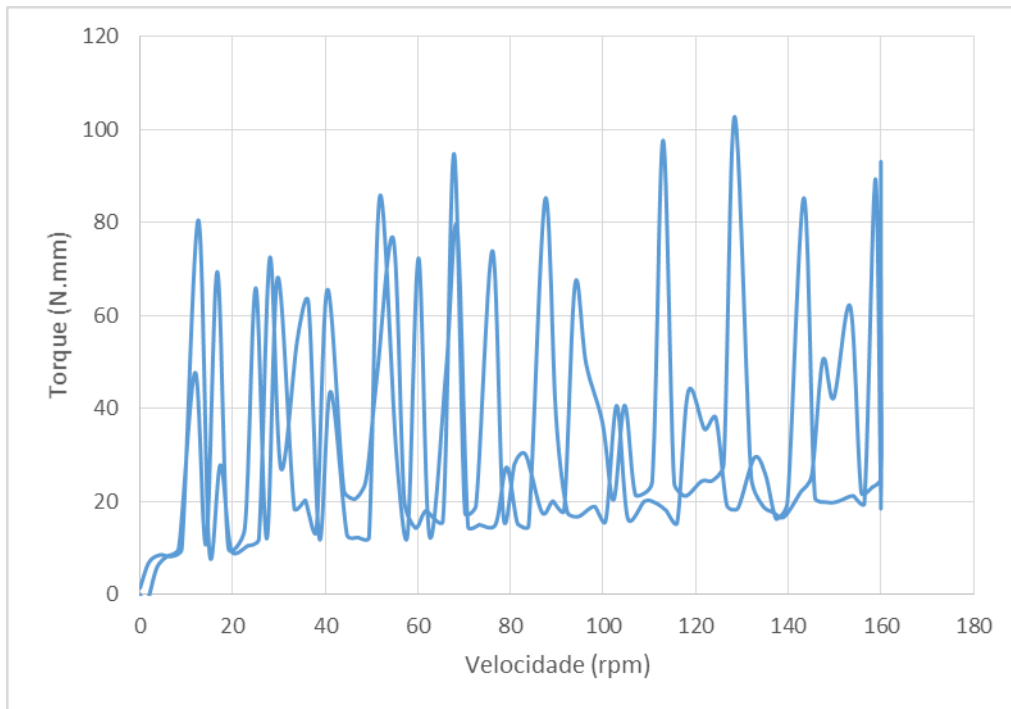


Figura 5.1. Variação do torque vs. velocidade para a pasta C50V50

A Figura 5.2 apresenta os resultados torque *versus* velocidade com o regime descendente, não qual os saltos de pontos, que caracterizam o fenômeno de “breakdown” são visíveis. Com a aplicação do modelo de Bingham, descrito pela equação da reta $T=g + hN$, onde T é o torque em N.mm, g é a tensão de cedência relativa em N.mm, h a viscosidade plástica relativa em N.mm.min e N a velocidade em rpm.

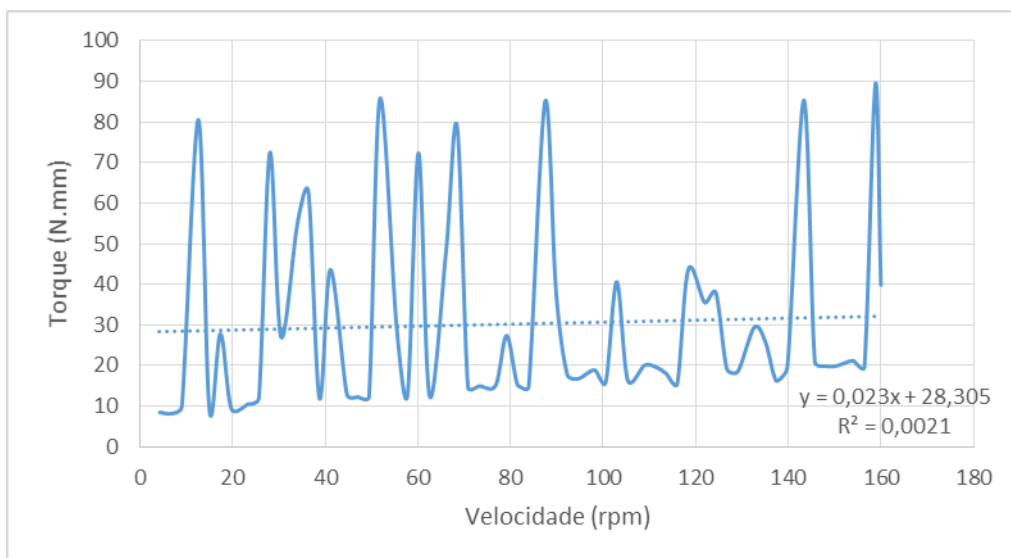


Figura 5.2. Variação do torque vs. velocidade em regime descendente para a pasta C50V50

Após o refinamento dos valores absurdos realizados com o critério de distanciamento de $\pm 10\%$ da média entre o valor superior e inferior de cada mudança de velocidade, a Figura 5.3

apresenta uma correlação bastante aceitável permitindo então a obtenção dos parâmetros reológicos relativos: tensão de cedência e viscosidade plástica.

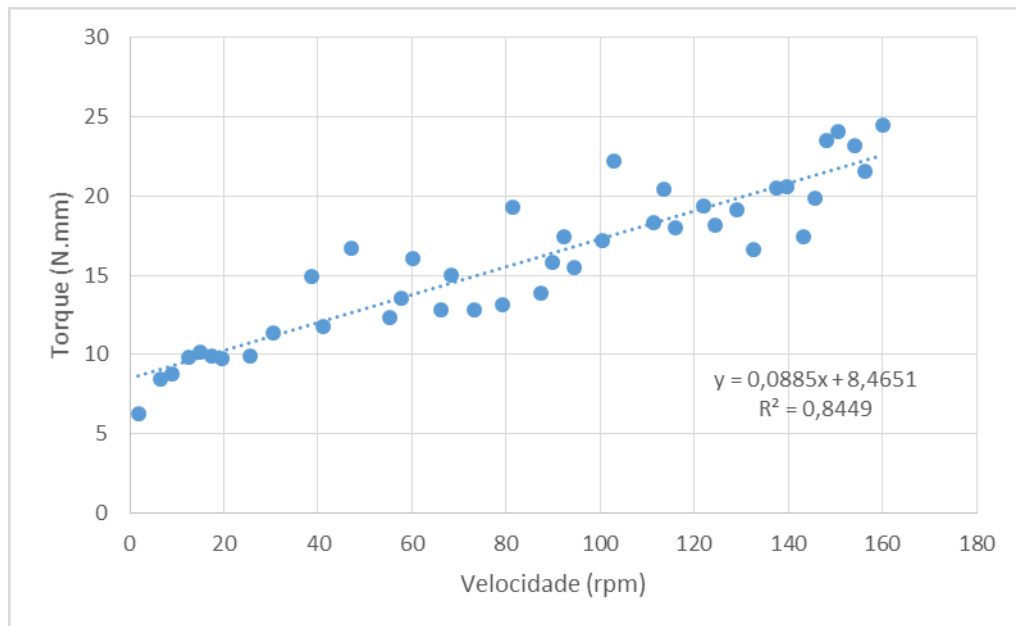


Figura 5.3. Variação do torque vs. velocidade em regime descendente para a pasta C50V50 após refinamento

A Tabela 5.1. resume os valores obtidos pelo modelo de Bingham para as pastas de cal hidratada e pó de vidro. Verifica-se que a tensão de cedência relativa aumenta com a diminuição do pó de vidro. Como a quantidade de água nas pastas é constante, conclui-se que a maior finura da cal juntamente com o caráter impermeável do vidro tenham efeitos significantes no aumento da tensão de cedência, bem como no aumento da viscosidade plástica ainda que neste parâmetro esse efeito seja menor. Pode-se prever destes resultados que do ponto de vista da trabalhabilidade de argamassas a pasta C50V50 seja a mais favorável.

Tabela 5.1. Equações do modelo de Bingham $T = g + hN$

Pastas	$T = g + hN$	R^2
C50V50	$T = 8,5 + 0,088N$	0,845
C60V40	$T = 23,6 + 0,211N$	0,977
C75V25	$T = 61,8 + 0,308N$	0,977
C85V15	$T = 109,2 + 0,283N$	0,736

Outro comportamento reológico identificado neste estudo foi a do comportamento tixotrópico das pastas. Verifica-se pelas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 uma histerese criada pelas curvas

ascendentes e descendentes, o que caracteriza justamente a tixotropia das pastas. Embora a medida da área envolvida pela histerese possa ser um indicador do nível de tixotropia, neste estudo devido aos distúrbios constatados com a pasta C50V50, fica satisfeita a condição de que argamassas governadas por estes tipos de pastas tendem à se reconstruir após as deformações decorrentes do trabalho de regularização e desempenho de maneira a assegurar coesão e evitar segregação.

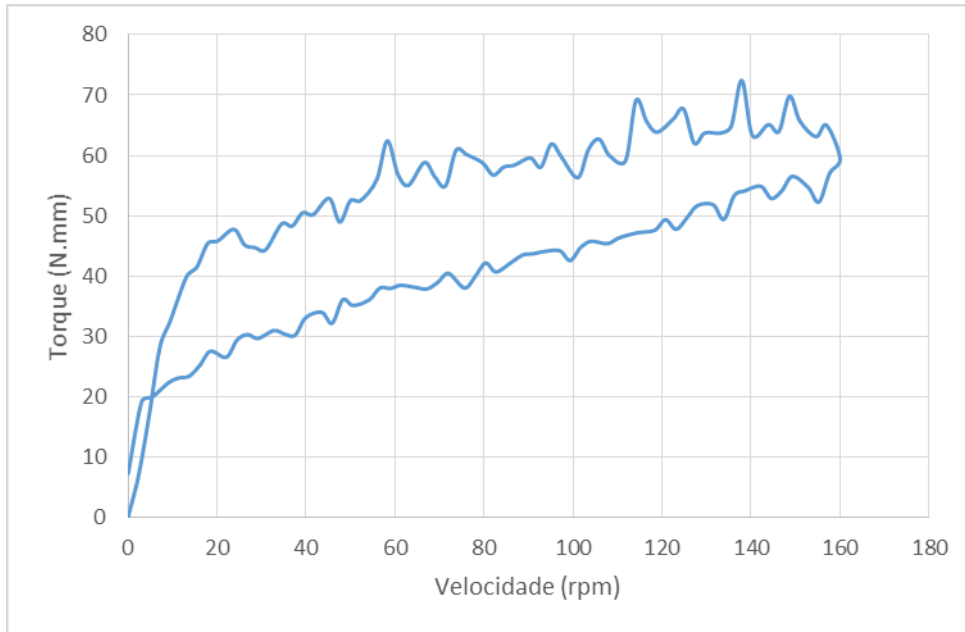


Figura 5.4. Variação do torque vs. velocidade para a pasta C60V40

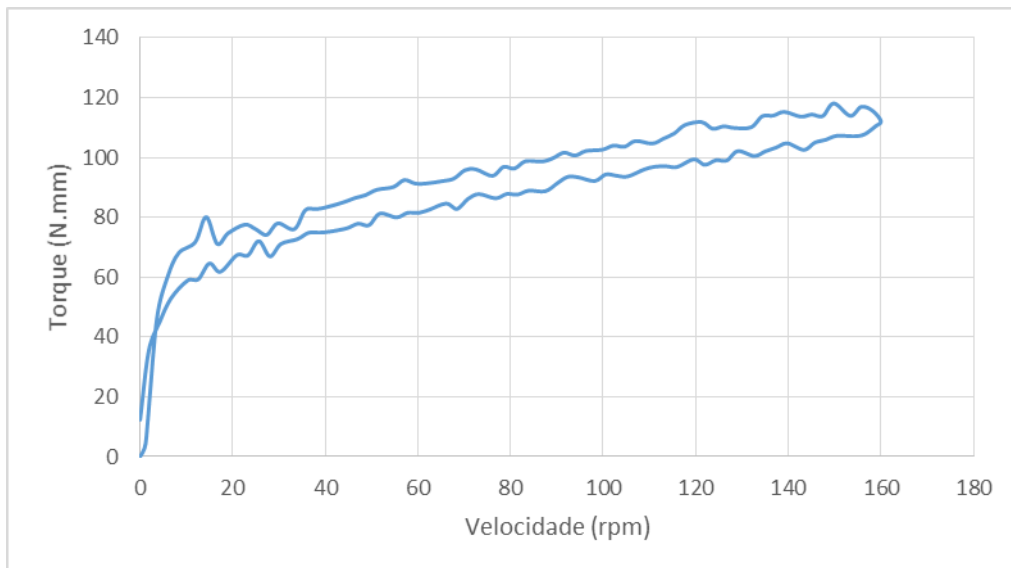


Figura 5.5. Variação do torque vs. velocidade para a pasta C75V25

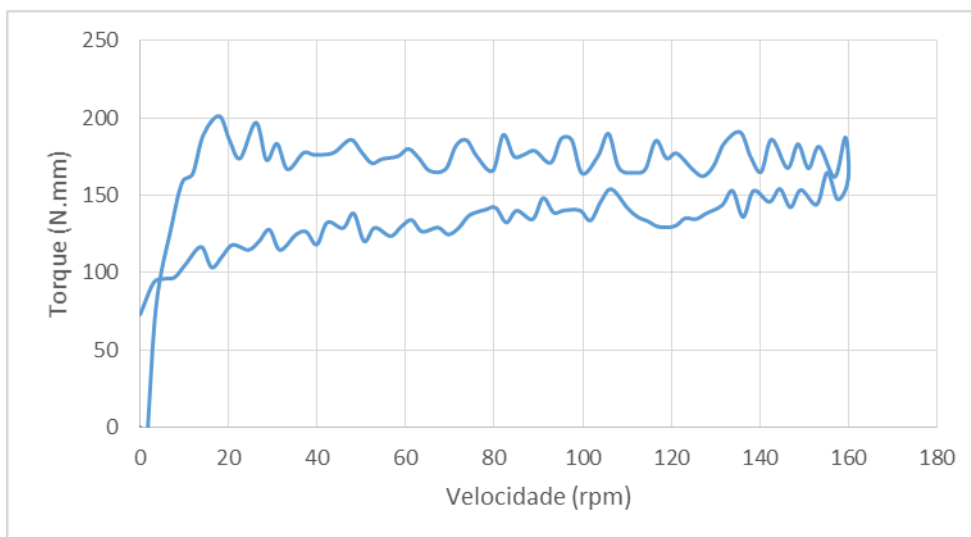


Figura 5.6. Variação do torque vs. velocidade para a pasta C85V15

5.2.2 No estado endurecido

5.2.2.1 Difração de raios X - DRX

Após observar os gráficos obtidos pela difração de raio x, pode-se concluir que existem 3 componentes principais às pastas de cal/vidro, portlandite Ca(OH)_2 , calcite CaCO_3 e silício Si.

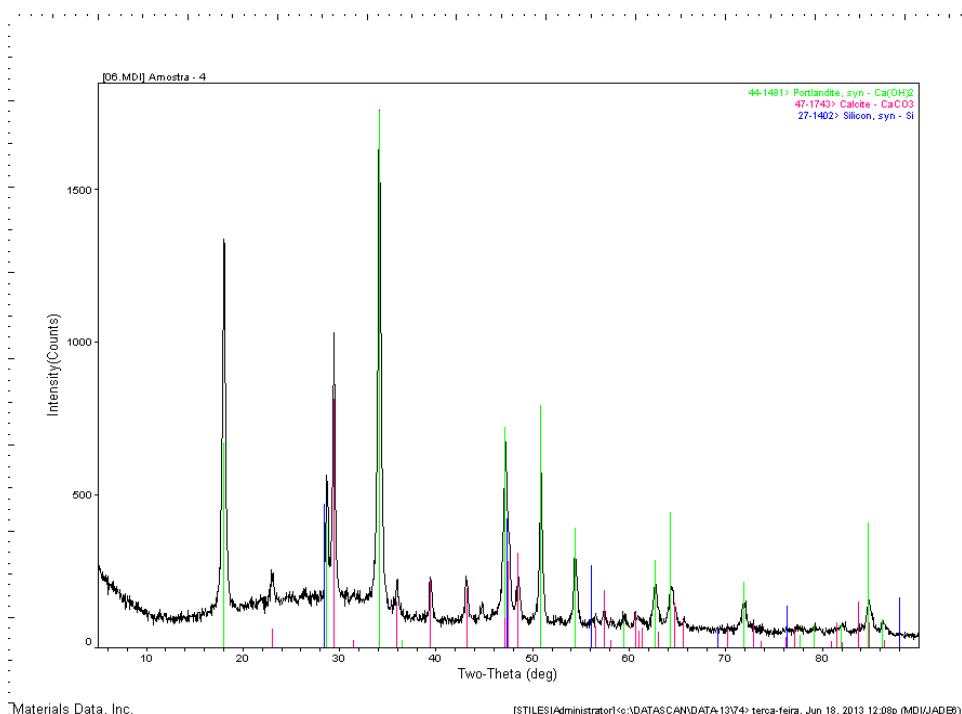


Figura 5.7. Difratograma da pasta C50 V50 aos 28 dias

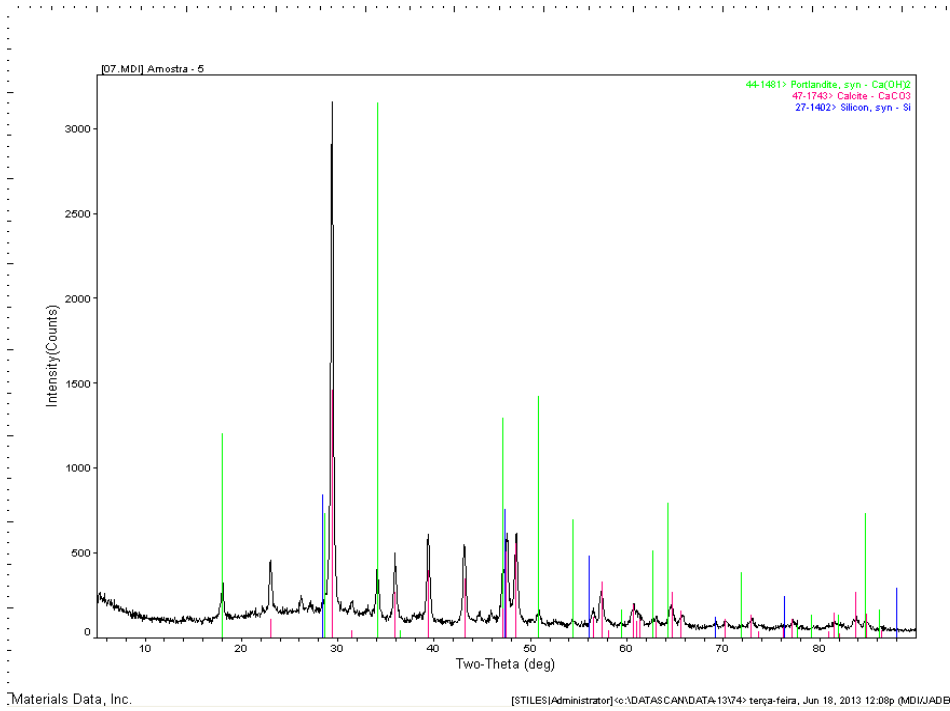


Figura 5.8. Difratoograma da pasta C50 V50 aos 63 dias

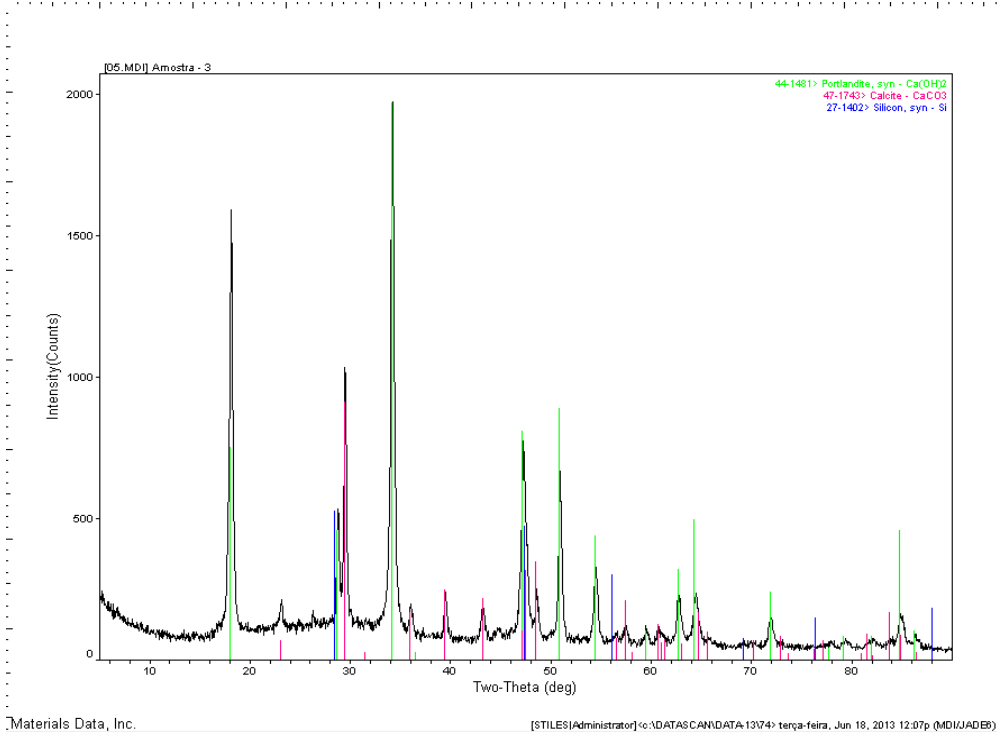


Figura 5.9. Difratoograma da pasta C60 V40 aos 28 dias

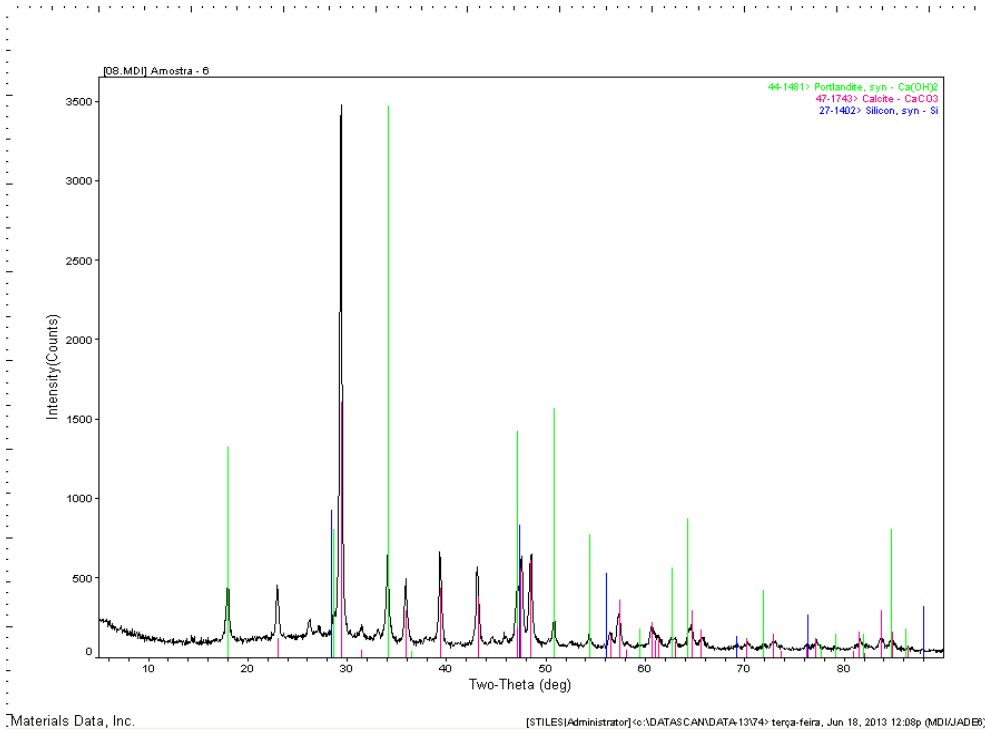


Figura 5.10. Difratograma da pasta C60 V40 aos 63 dias

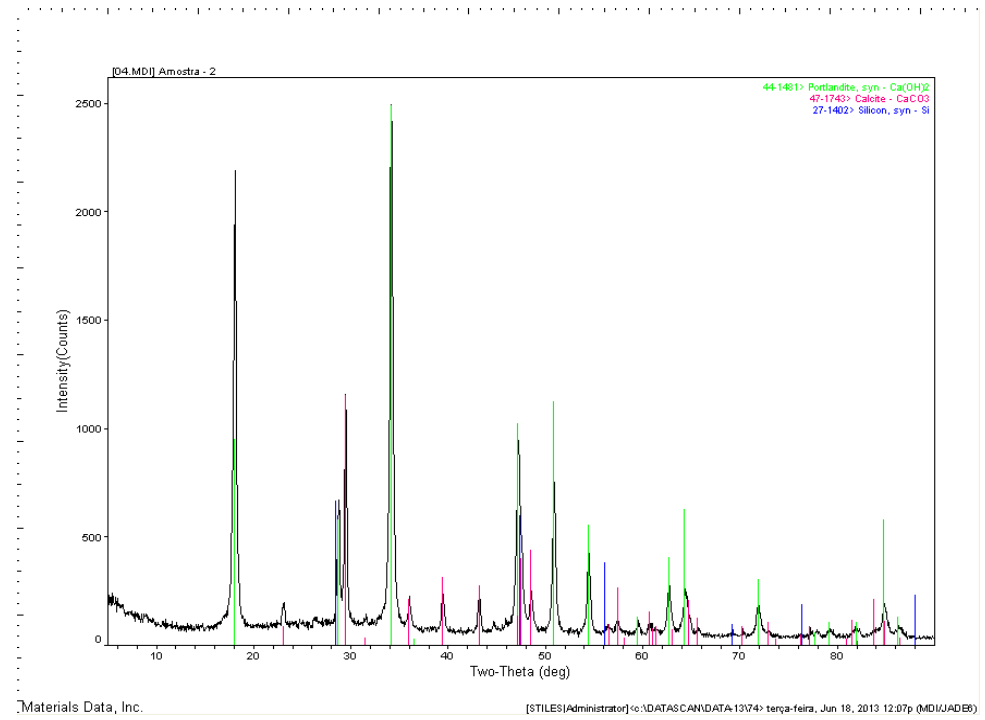


Figura 5.11. Difratograma da pasta C75 V25 aos 28 dias

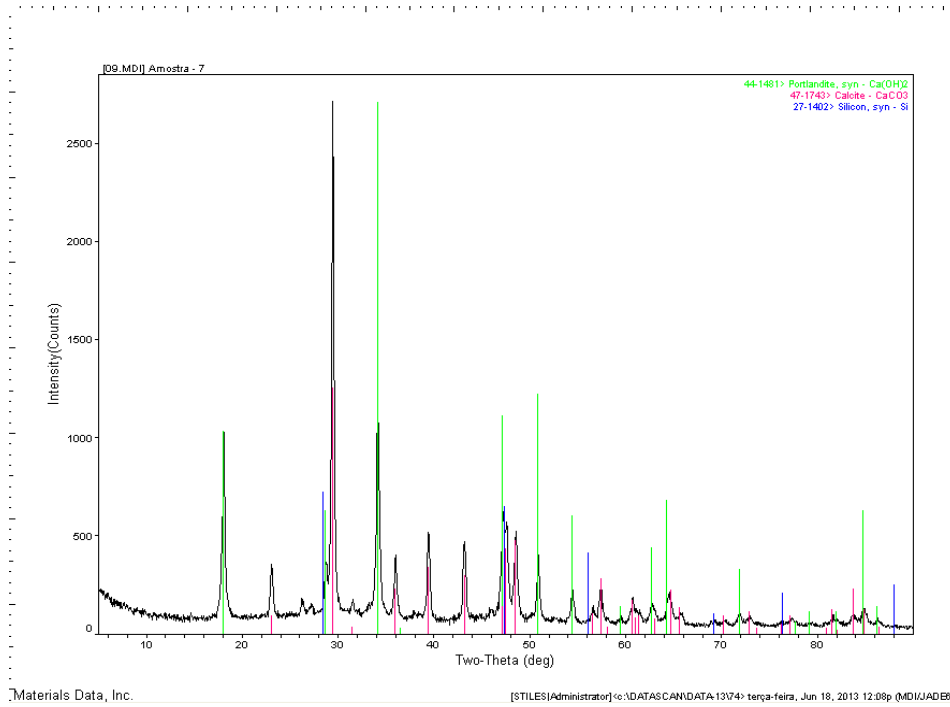


Figura 5.12. Difratoograma da pasta C75 V25 aos 63 dias

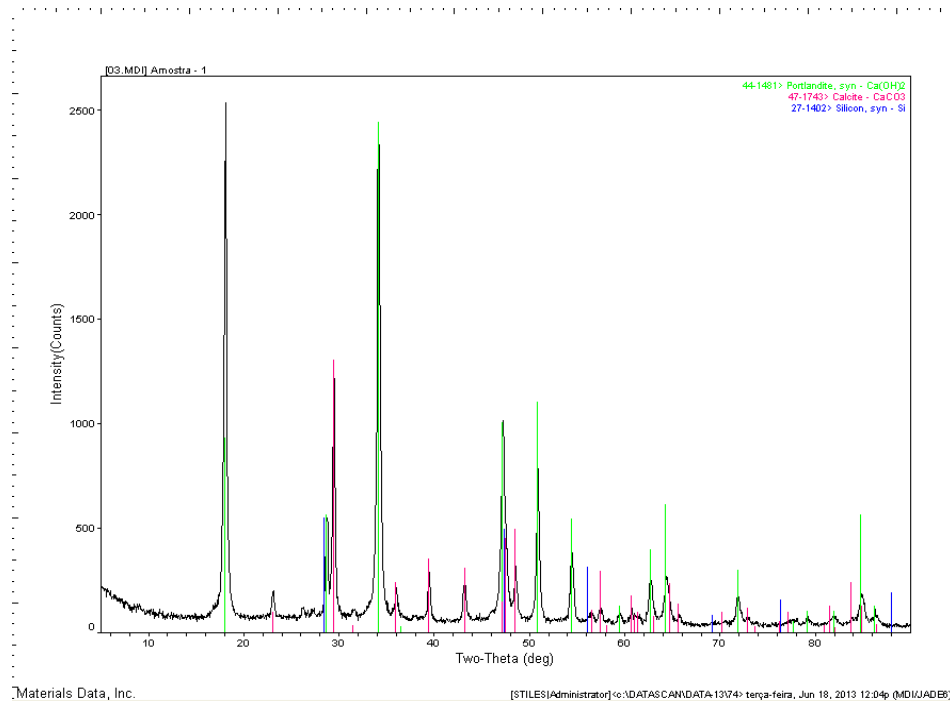


Figura 5.13. Difratoograma da pasta C85 V15 aos 28 dias

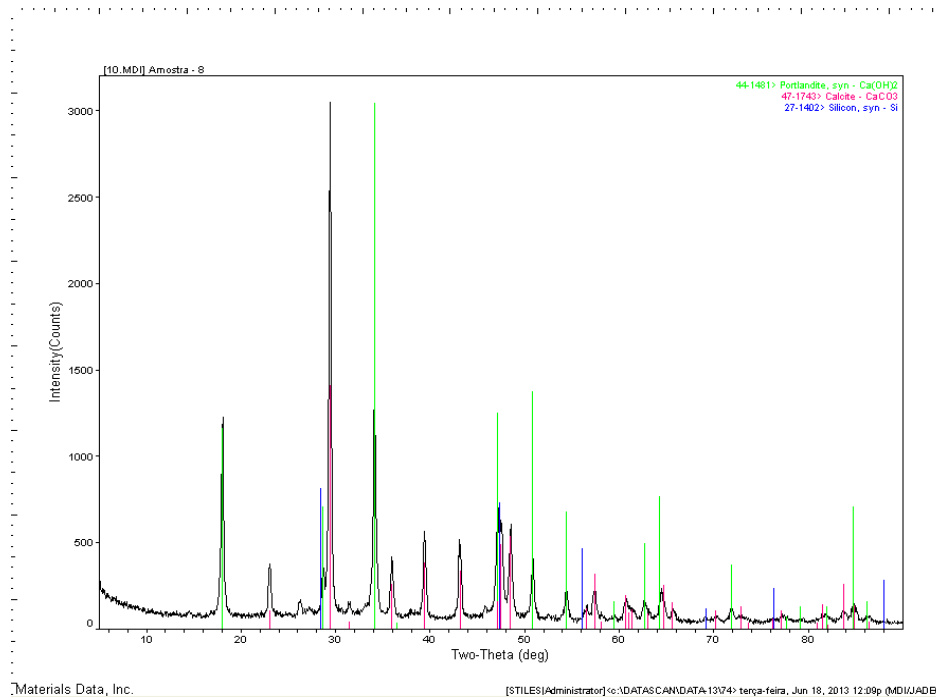


Figura 5.14. Difratoograma da pasta C85 V15 aos 63 dias

Analisando as figuras 5.7 a 5.14, verifica-se que a calcite é o composto predominante em todas as amostras para todas as idades indicando que a reação de carbonatação superou a existência de uma eventual reação pozolânica.

Verifica-se também com o aumento da substituição de cal por vidro existe uma diminuição da portlandite acompanhada por um aumento da calcite. Isto deve-se à variação do grau de ocorrência da reação pozolânica que é maior onde se detecta menores quantidades de portlandite para reagir. Pode constatar-se que mesmo aos 63 dias todas as amostras apresentam portlandite, isto significa que nenhuma das amostras apresentam concluídas as reações pozolânicas.

5.2.2.2 Análise termogravimétrica - ATG

A análise termogravimétrica serve de complemento à análise do DRX, onde é possível identificar e quantificar produtos voláteis relacionados com a presença de determinados compostos característicos das argamassas de cal, neste caso a presença de portlandite livre e de carbonatos.

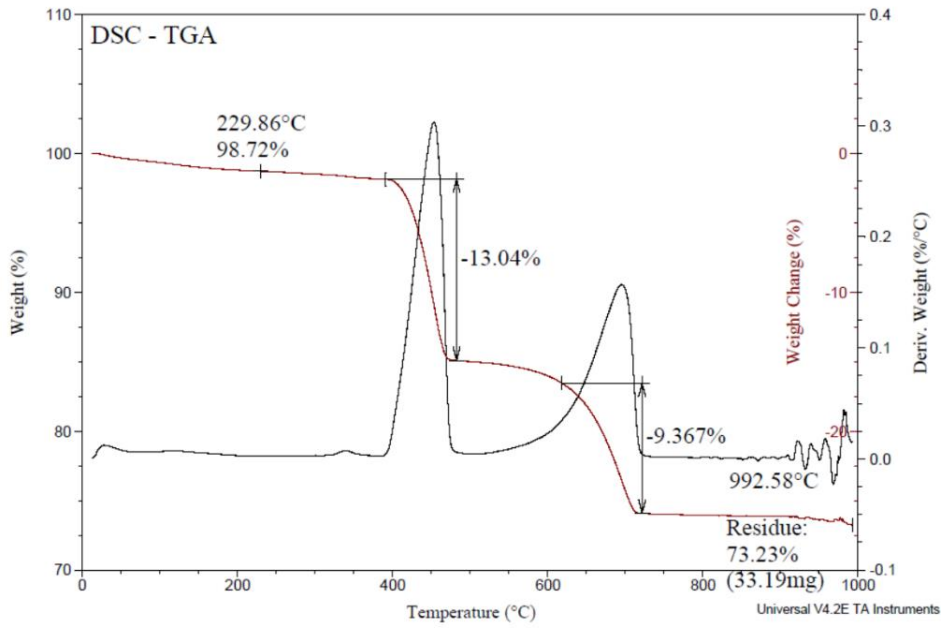


Figura 5.15. ATG da pasta C50 V50 aos 28 dias.

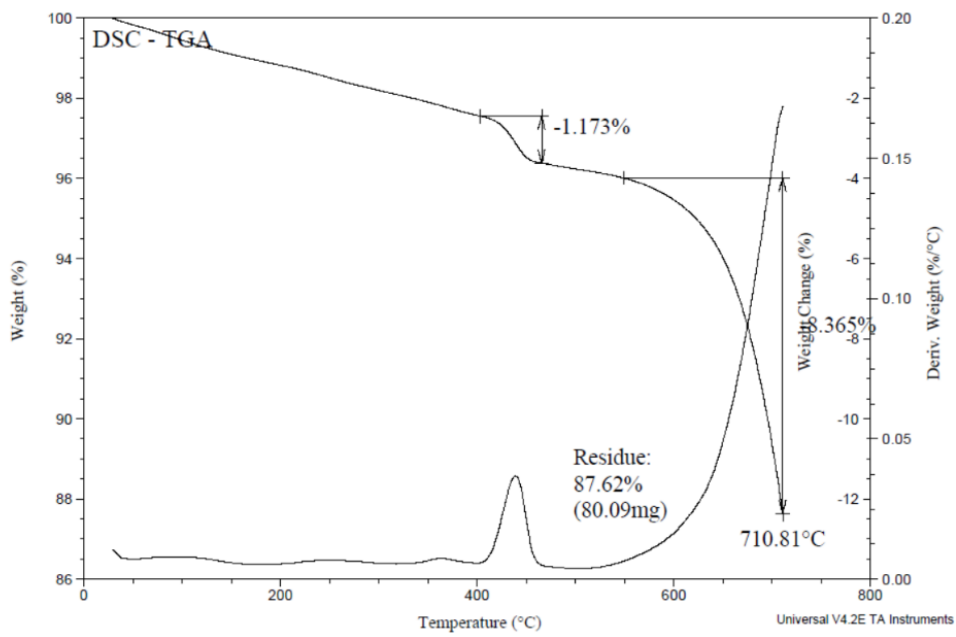


Figura 5.16. ATG da pasta de C50 V50 aos 63 dias

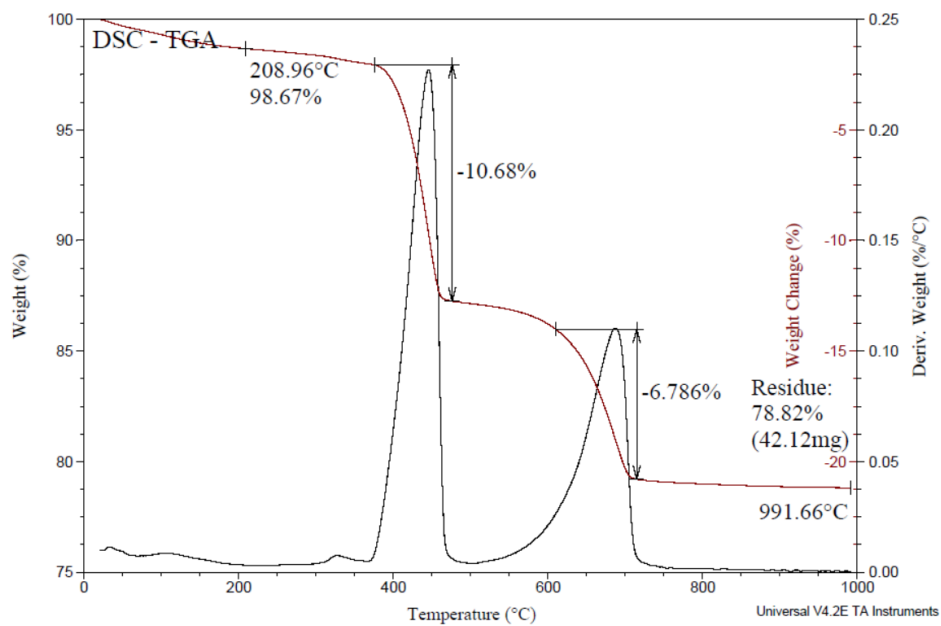


Figura 5.17. ATG da pasta C60 V40 aos 28 dias

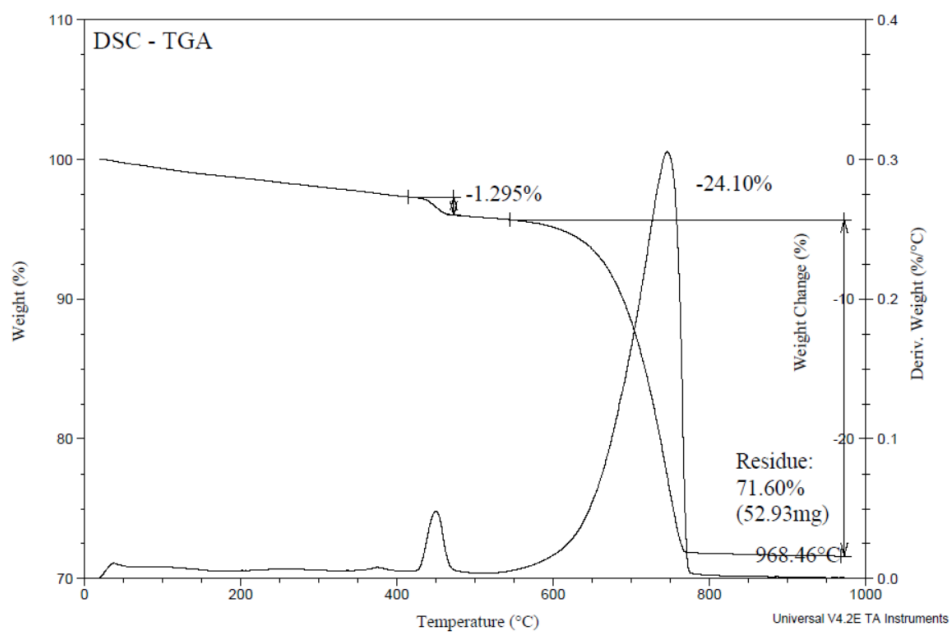


Figura 5.18. ATG da pasta C60 V40 aos 63 dias

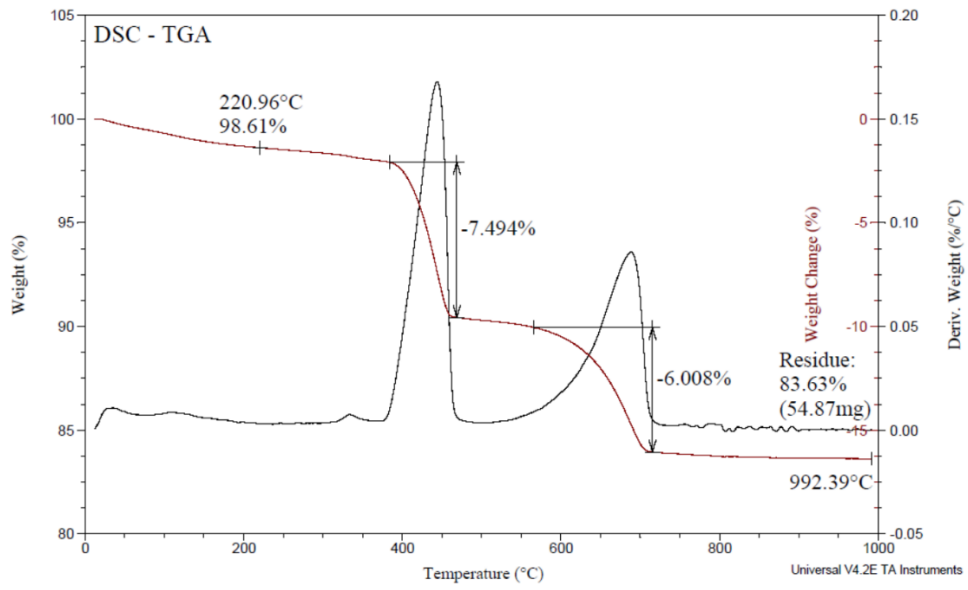


Figura 5.19. ATG da pasta C75 V25 aos 28 dias

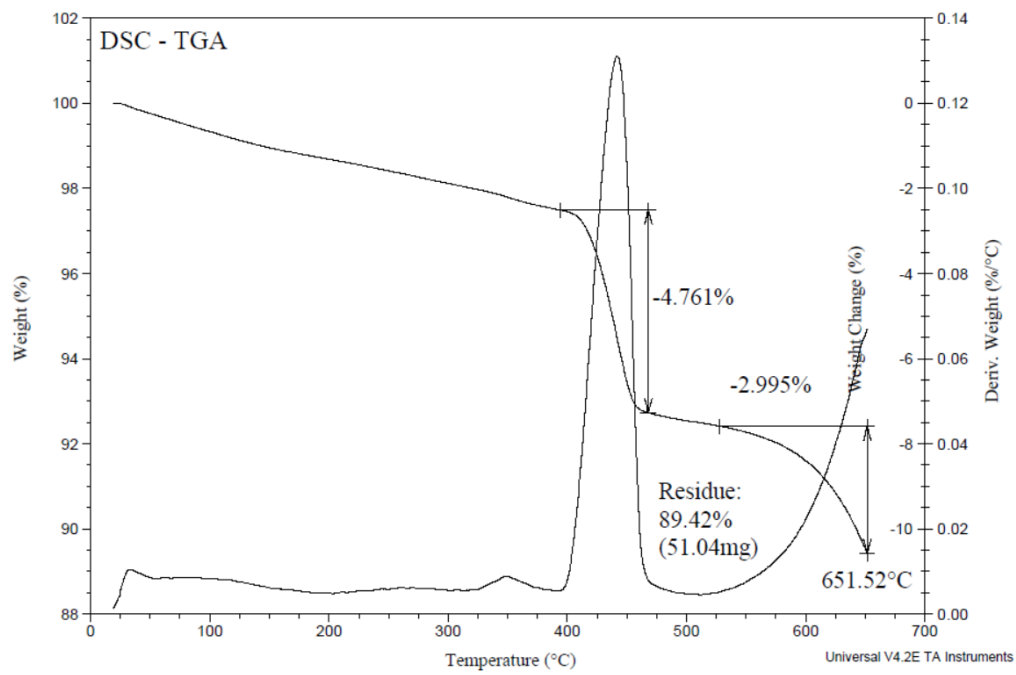


Figura 5.20. ATG da pasta C75 V25 aos 63 dias

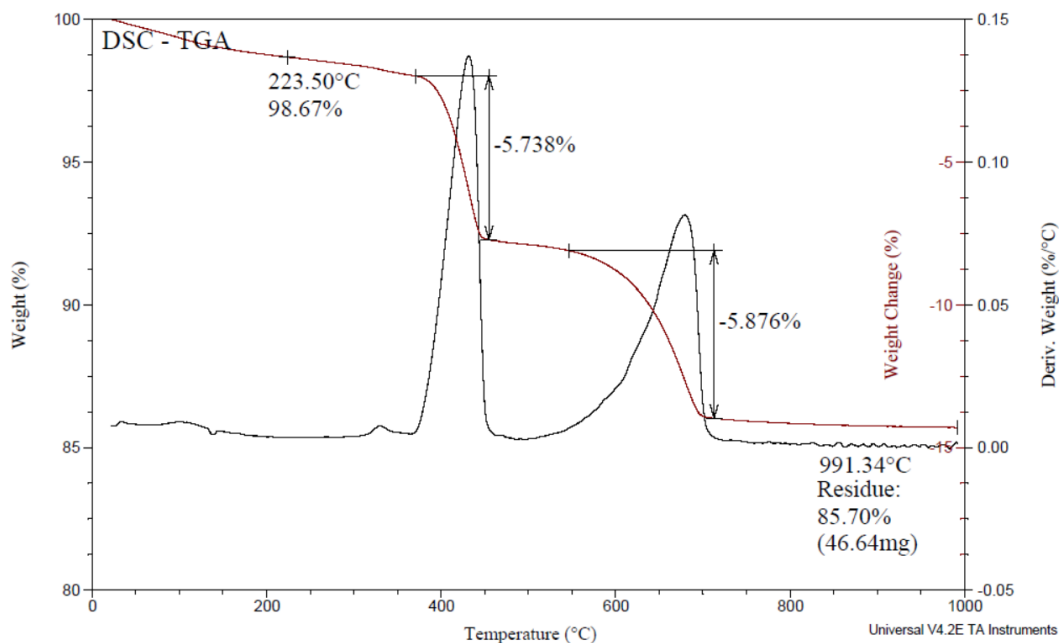


Figura 5.21. ATG da pasta C85 V15 aos 28 dias

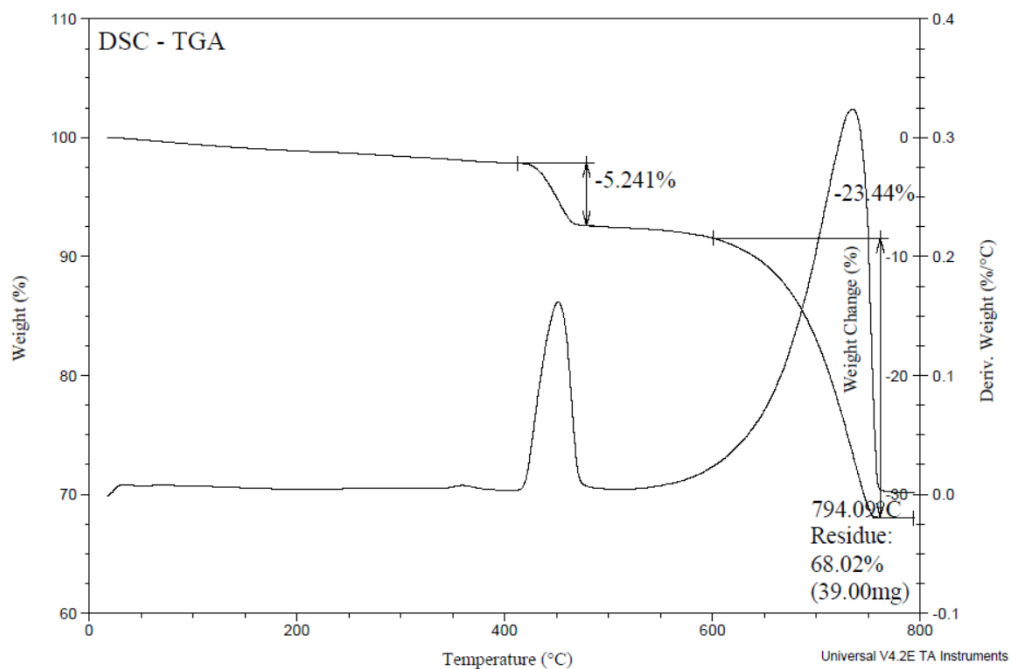


Figura 5.22. ATG da pasta C85 V15 aos 63 dias

Nas figuras 5.15 a 5.22 apresentadas pela análise termogravimétrica é possível observar duas reações. Em primeiro lugar entre os 400° e os 550°C ocorre a reação de desidroxilação (desidratação da portlandite), ou seja a perda de água associada ao hidróxido de cálcio. A outra reação ocorre entre os 600° e os 800°C a reação de descarbonatação, onde existe libertação de CO₂ por parte do carbonato de cálcio.

Verifica-se também com o aumento de cal nas argamassas as perdas devido desidroxilação e a descarbonatação aos 28 dias são reduzidas, sendo que estas perdas são maiores no caso da

desidroxilação. O mesmo não se verifica aos 63 dias, onde as perdas por descarbonatação são superiores.

Pelo DRX e pelo ATG pode-se estimar que a pasta C50 V50 tem maior potencial para desenvolver reação pozolânica uma vez que apresenta a menor quantidade de portlandite pode indicar combinações não reveladas [45]

5.3 Propriedades das argamassas

5.3.1 No estado fresco

5.3.1.1 Consistência por espalhamento

O ensaio da mesa de espalhamento verifica-se a consistência por espalhamento, ou seja fluidez de cada argamassa realizada. O espalhamento foi predefinido de modo a determinar a quantidade de água nas argamassas, o valor definido foi de 180 ± 10 mm.

Tabela 5.2. Determinação da consistência na mesa de espalhamento

Argamassa	Média	DP
Referência	180	0
C50 V50	176,7	2,9
C60 V40	177,3	2,5
C75 V25	180,7	1,2
C85 V15	181,0	1,0

5.3.1.2 Determinação da retenção de água

Os valores obtidos no ensaio de retenção de água estão representados na tabela 5.3

Tabela 5.3. Determinação da retenção de água

Argamassa	Media	DP
Referência	88.14	0,20
C50V50	83.04	0,51
C60V40	83.69	0,30
C75V25	83.30	0,99
C85V15	84.72	0,16

As argamassas apresentam uma retenção de água elevada, o que significa que quando aplicadas em condições ambientais adversas tem um bom comportamento. Verifica-se ainda que, nas amostras em que se varia a cal a retenção de água aumenta.

Comparativamente à argamassa de referência que possui uma maior retenção de água, a incorporação do pó de vidro tem influência relevante na medida em que a área específica da mistura é diminuída, diminuindo portanto a área de molhagem.

5.3.1.2 Determinação da massa volúmica

Os valores da massa volúmica da argamassa em estão representados na seguinte tabela 5.4

Tabela 5.4. Determinação da massa volúmica

Argamassa	Massa Volúmica [Kg/m ³]
Arg. Referencia	2024,3
C50V50	2040,8
C60V40	2021,7
C75V25	1987,8
C85V15	1962,3

Através da análise da tabela pode-se verificar que a massa volúmica diminui com a introdução de cal aérea.

5.3.1.2 Determinação da consistência pelo método de penetração

Os valores da consistência pelo método de penetração são apresentados na seguinte tabela 5.5.

Tabela 5.5. Determinação dos valores por penetração

Argamassa	Média	DV
Ref	7,0	1,0
C50 V50	4,0	1,0
C60 V40	4,7	0,6
C75 V25	6,0	2,6
C85 V15	7,3	1,2

Da análise dos resultados obtidos pelo método de penetração, conclui-se com o aumento da cal aumenta a consistência da argamassa. O mesmo verificou-se na determinação da consistência por espalhamento.

5.3.1.3 Determinação das propriedades reológicas das argamassas

Em seguida será apresentado e discutido os gráficos obtidos pela análise reológica das diferentes argamassas.

As curvas de fluxo são representadas pela variação do torque em função da velocidade de rotação, a partir dos quais é possível determinar parâmetros proporcionais à viscosidade plástica (h) e à tensão de cedência (g) através do declive da recta, considerando que se trata de um comportamento Binghamiano ($T=g+hN$).

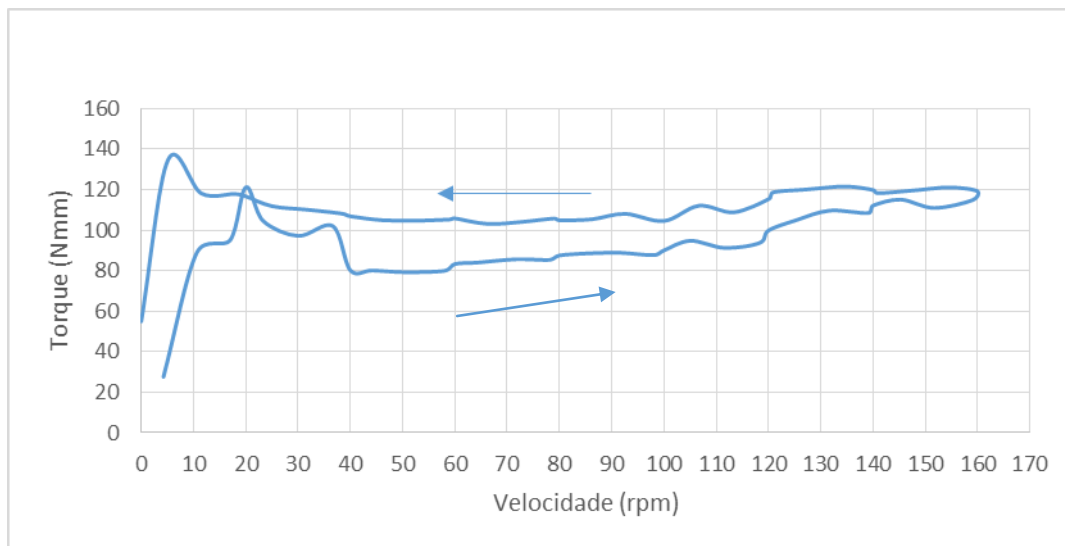


Figura 5.23. Variação do torque em função da velocidade de ensaio, para argamassa de referência.

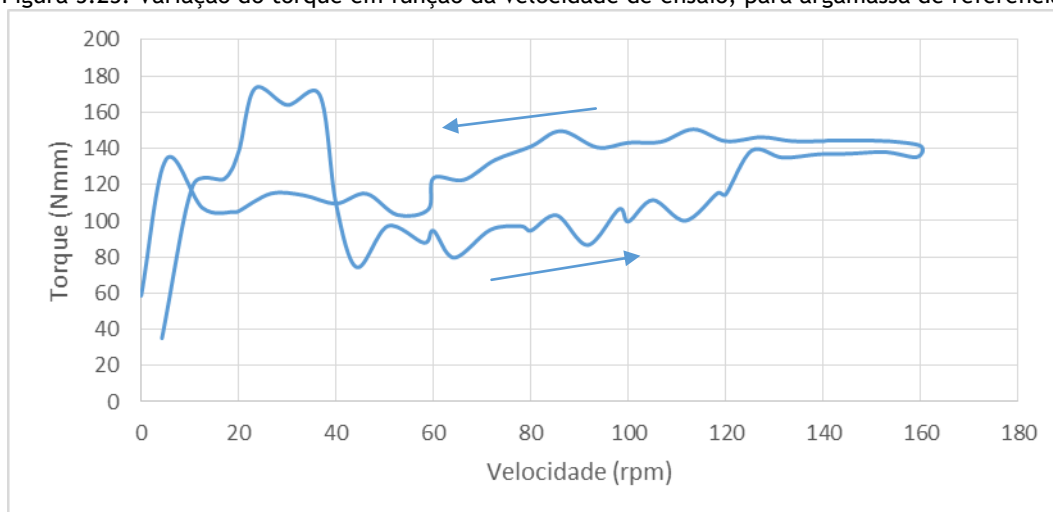


Figura 5.24. Variação do torque em função da velocidade de ensaio para argamassa de C50 V50

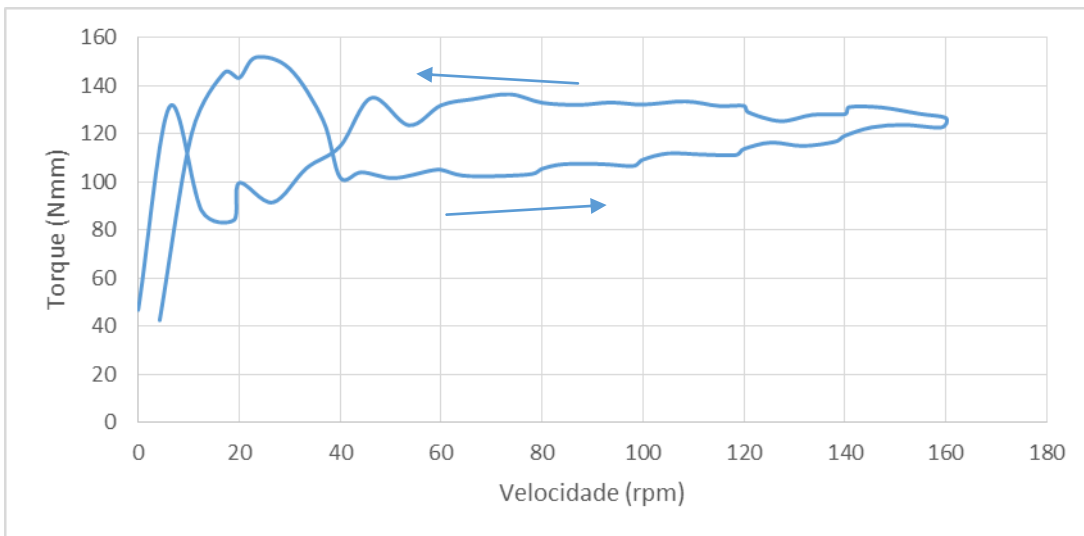


Figura 5.25. Variação do torque em função da velocidade para argamassa C60 V40

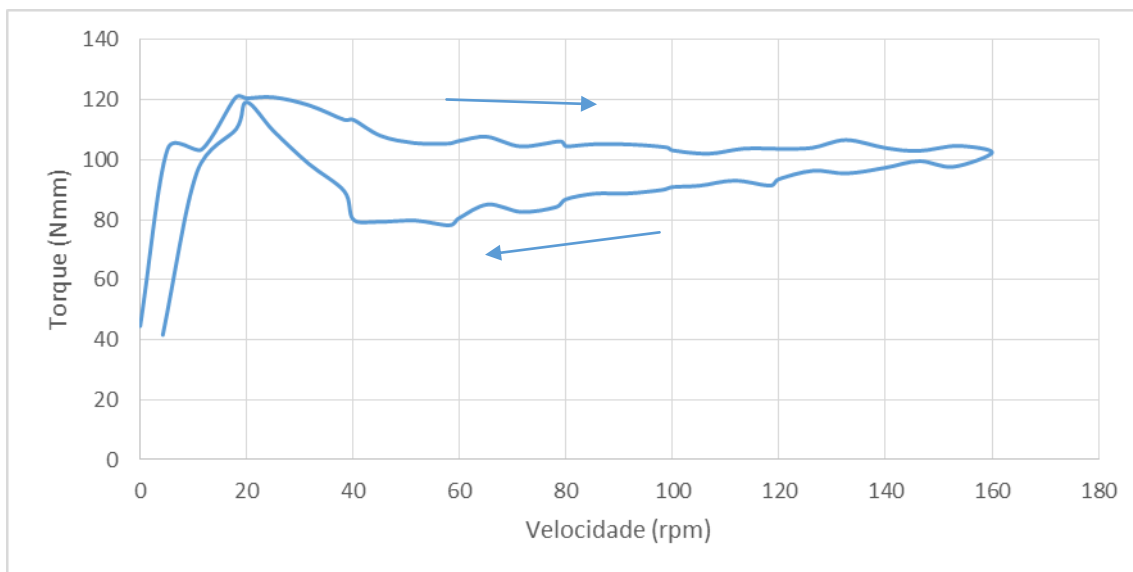


Figura 5.26. Variação do torque em função da velocidade para argamassa C75 V25

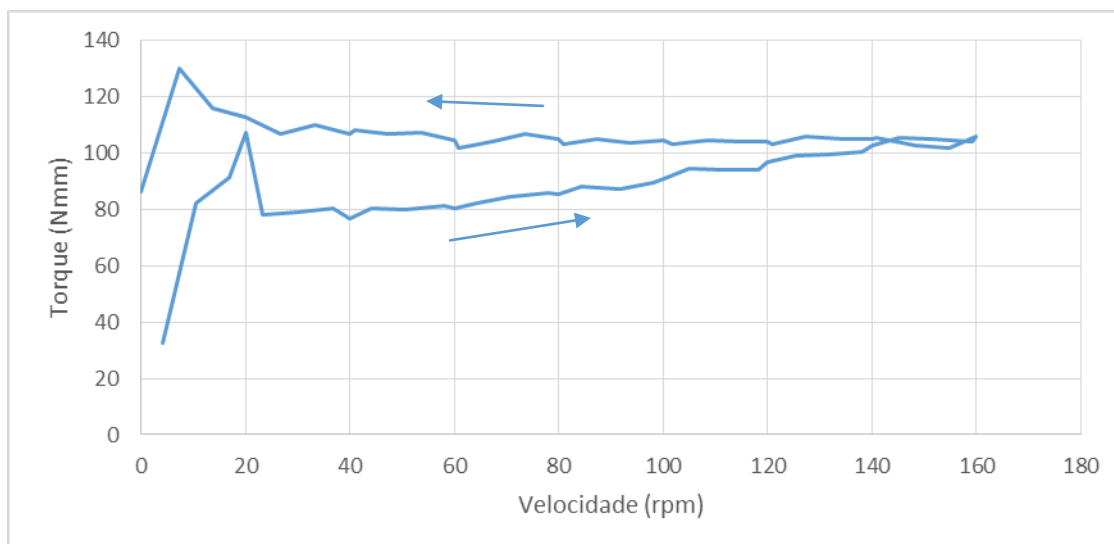


Figura 5.27. Variação do torque em função da velocidade para argamassa C85 V15

Nas figuras 5.23, 5.24, 5.25 e 5.27 verifica-se que a curva ascendente está abaixo da curva descendente, ou seja estamos num comportamento reopético. Verifica-se que a argamassa se reconstrói muito mais rapidamente do que ser destrói. O comportamento é caracterizado por um acréscimo na viscosidade com o aumento da taxa de deformação. A viscosidade das argamassas está relacionada com o teor de água e com a dimensão e origem mineralógica dos agregados.

O comportamento reopético dos materiais é raro de ser presenciado em ensaios de reologia, mas tal comportamento já tem sido constatado no caso do uso de argamassas com cal [45]. A explicação de maior adesibilidade entre as partículas dos materiais componentes das argamassas aqui estudadas merecem maior consideração, fato que neste estudo não foi possível elucidar. Não obstante, sabe-se que tal comportamento advém da presença da cal hidratada.

Na figura 5.26 é apresentado um comportamento tixoprópico, a curva ascendente está acima da curva descendente, ou seja a viscosidade diminui em função do tempo de corte.

É consensual segundo vários autores que a curva obtida em regime de velocidade descendente assegura maior fiabilidade para a determinação dos parâmetros reológicos g e h , uma vez que as curvas obtidas com velocidades ascendentes refletem o fenómeno de reconstrução estrutural decorrente do repouso da suspensão.

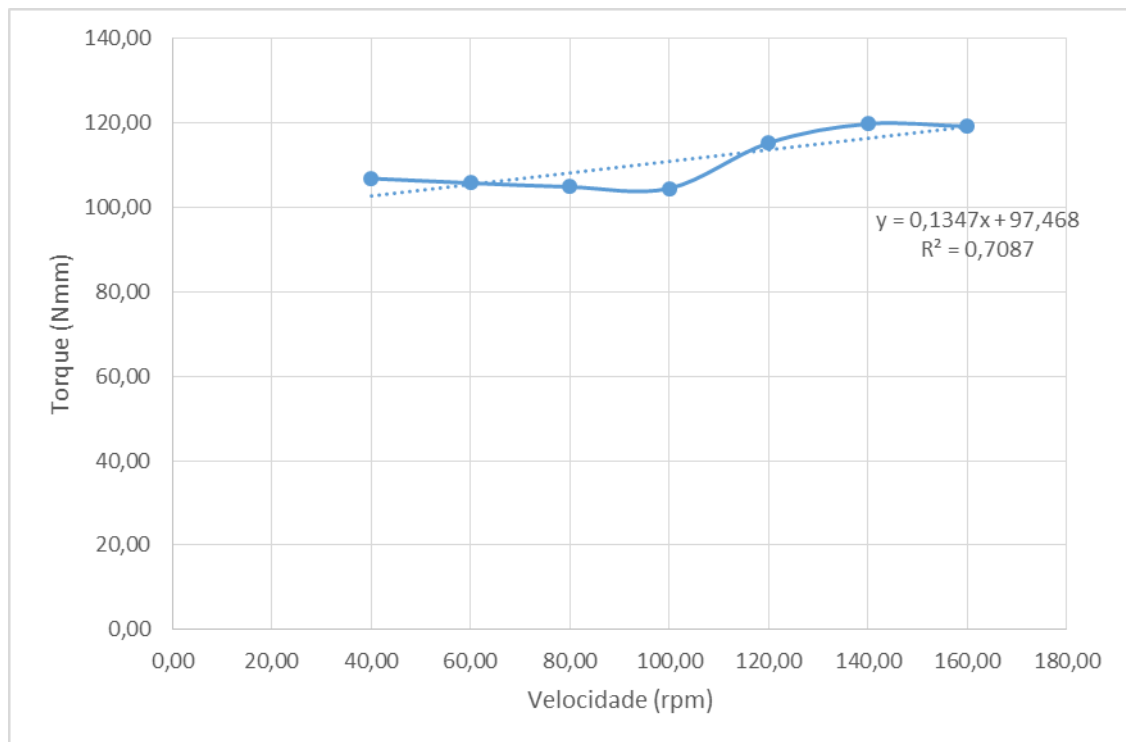


Figura 5.28. Variação do torque em função da velocidade para a argamassa de referência, regime descendente

Tabela 5.6. Equações do modelo de Bingham $T = g + hN$

Argamassas	$T = g + hN$	R^2
Referencia	$T = 97.67 + 0,13N$	0,71
C50V50	$T = 105.44 + 0,29N$	0,76
C60V40	$T = 137.08 - 0,06N$	0,75
C75V25	$T = 112.24 - 0,07N$	0,63
C85V15	$T = 103.5 + 0,01N$	0,42

Segundo Banfill confirmou experimentalmente que g e h são diretamente proporcionais à tensão de cedência e à viscosidade plástica respectivamente.

Observando os valores da Tabela 5.6, pode-se verificar que as argamassas de cal/vidro possuem tensões de cedência superiores a argamassa de referência e viscosidade plástica relativa menores nos casos de redução e teor de vidro a partir de 40% (C60V40). Outra característica das argamassas com vidro é a fluidificação das argamassas C60V40 e C75V25 onde o sinal negativo precede os valores de viscosidade. Também pode-se dizer que a viscosidade diminui com a redução da incorporação do pó de vidro. Fato explicado pela maior área específica da cal em relação ao pó de vidro que se considera impermeável.

5.3.2 No estado endurecido

5.3.2.1 Resistência mecânica à flexão e à compressão

A resistência mecânica é uma propriedade muito importante da argamassa, pois tem implicação direta na sua durabilidade.

Os ensaios de flexão e compressão foram realizados aos 28 e 63 dias. Os corpos de prova foram inicialmente submetidos ao ensaio de flexão, usando-se posteriormente as metades resultantes deste ensaio para a realização do ensaio à compressão. Os resultados obtidos estão presentes nas figuras seguintes.

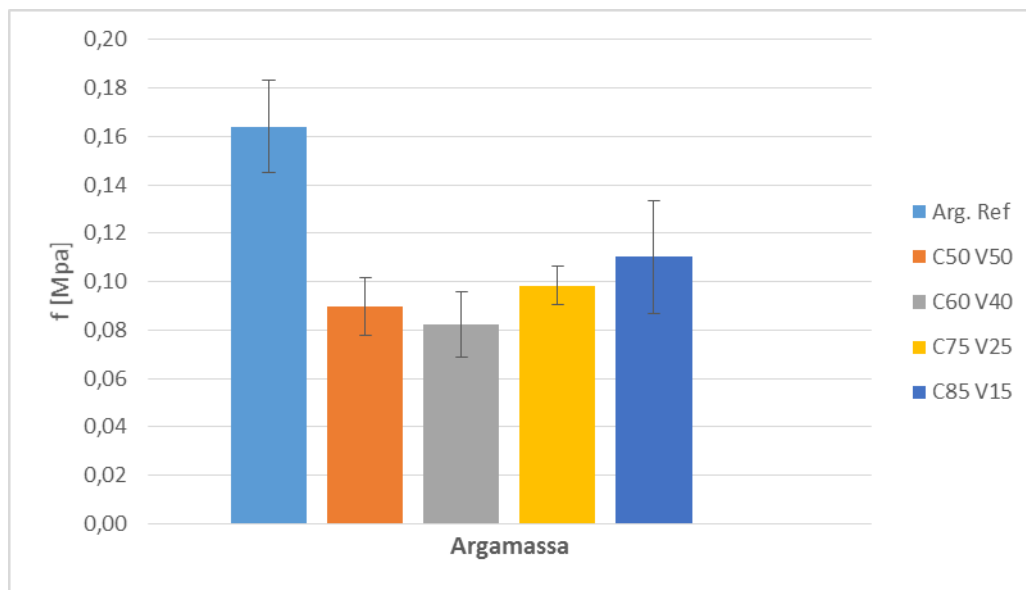


Figura 5.29. Resistência à flexão aos 28 dias.

Verifica-se na figura 5.29 que as argamassas com 28 dias, com percentagem de substituição de cal/vidro apresentam valores inferiores comparativamente à argamassa de referência. Porém, entre as argamassas com incorporação de vidro não há diferenças significativas das resistências à flexão.

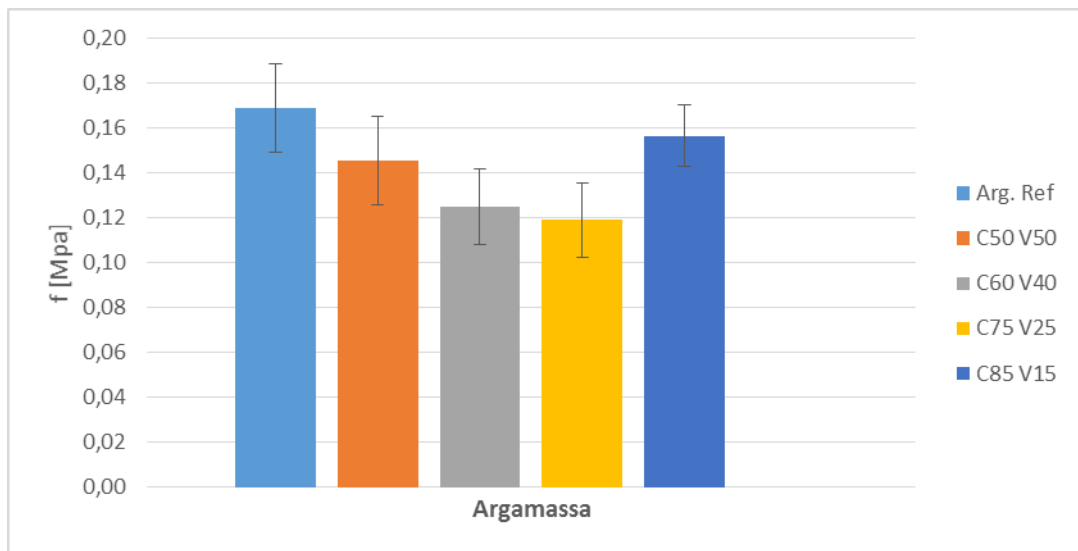


Figura 5.30. Resistência à flexão aos 63 dias

Na figura 5.30 pode-se verificar que aos 63 dias a argamassa de referência também apresenta valor superior às restantes. As argamassas de C60 V40, bem como a C75V25 apresentam resultados significativamente inferiores à argamassa de referência. Ao mesmo a C85V15 teve valor superior a C75V25. Enquanto na argamassa de referência a evolução da resistência à flexão foi da ordem 60 a 20% em função do aumento de cal hidratada.

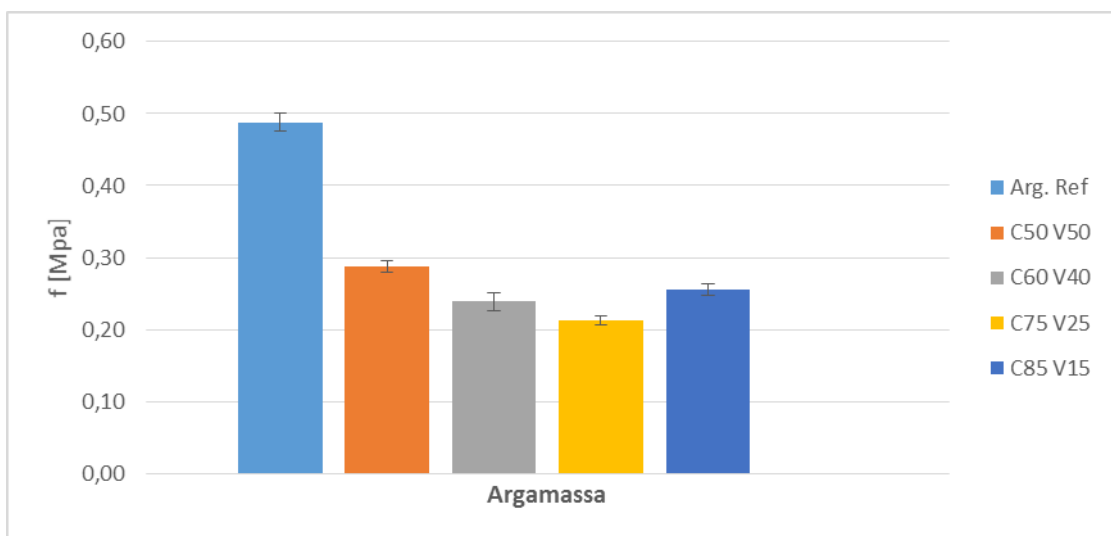


Figura 5.31. Resistência à compressão aos 28 dias

Como se verifica na figura 5.31 a argamassa de referência é a que apresenta maior resistência à compressão. A resistência à compressão aos 28 dias de idade diminui com o aumento da incorporação de pó de vidro. Os resultados aos 28 dias são significativamente diferentes entre as argamassas de referência e as argamassas C50V50, C60V40 e C75V25. A argamassa C85V15 se assemelha à argamassa C60V40. O valor 9% superior da argamassa C85V15 em relação à C75V25 é concebível para a variação intrínseca do método e dos materiais.

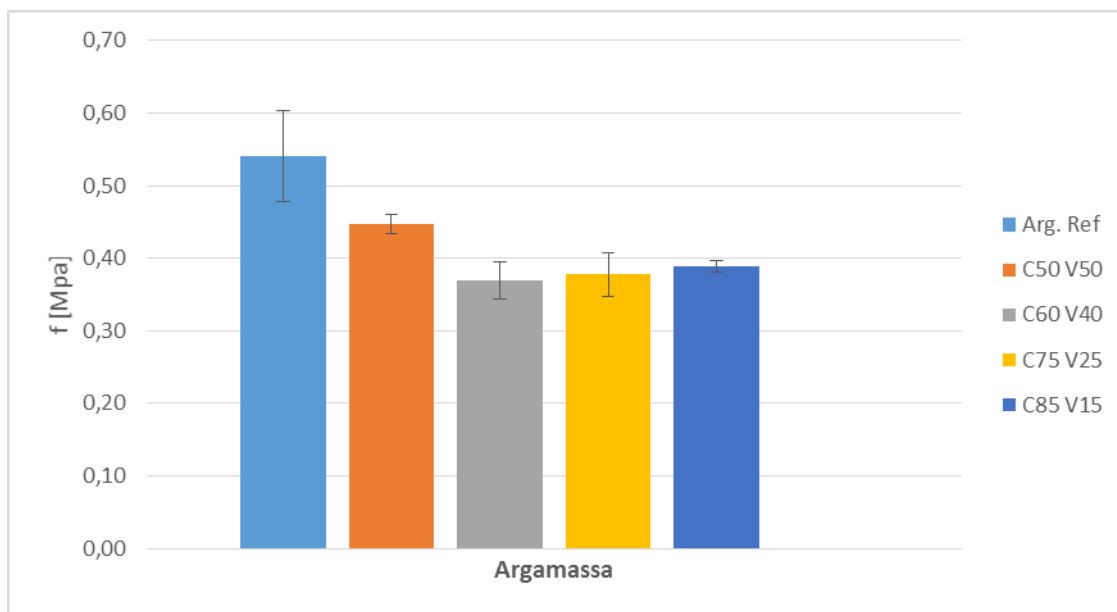


Figura 5.32. Resistência à compressão aos 63 dias

Como se pode observar na figura 5.32 a argamassa de referência que também apresenta maior resistência à compressão aos 63 dias comparativamente às restantes argamassas. A argamassa C50 V50 aproxima-se do valor de resistência à compressão da argamassa de referência, tendo resultado num aumento de cerca de 55% em relação ao obtido aos 28 dias. Note-se que a argamassa de referência apenas evolui em cerca de 10%. Comparativamente aos resultados obtidos pelas figuras 5.31 e 5.32, verifica-se que existe um aumento de resistência à compressão aos 63 dias para todas as argamassas com vidro.

Além dos resultados obtidos pela compressão e flexão, pode-se avaliar outro parâmetro, a razão R_t/R_c . Este coeficiente pode ser indicador da ductilidade das argamassas. A ductilidade indica a capacidade da argamassa se deformar consoantes as solicitações mecânicas a que esta sujeita. Segundo Veiga, et al [], quanto maior for este coeficiente, mais dúctil é a argamassa. Um comportamento mais dúctil permite otimizar as resistências das argamassas às tensões criadas, sem que sejam transmitidos esforços muito elevados para o suporte. Os valores da relação R_t/R_c apresentados na tabela 5.7 indica-nos com o aumento de cal nas argamassas aumenta a sua ductilidade, também verifica-se com o aumento de tempo de cura essa ductilidade, em geral, vai decrescendo.

Tabela 5.7. Relação Rt/RC

Argamassa	Rt/Rc 28 dias	Rt/Rc 63 dias
Ref.	0,34	0,31
C50V50	0,31	0,33
C60V40	0,35	0,34
C75V25	0,46	0,32
C85V15	0,43	0,40

5.3.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico permite avaliar a deformabilidade das argamassas, ou seja com o aumento da deformabilidade corresponde a uma diminuição do módulo de elasticidade.

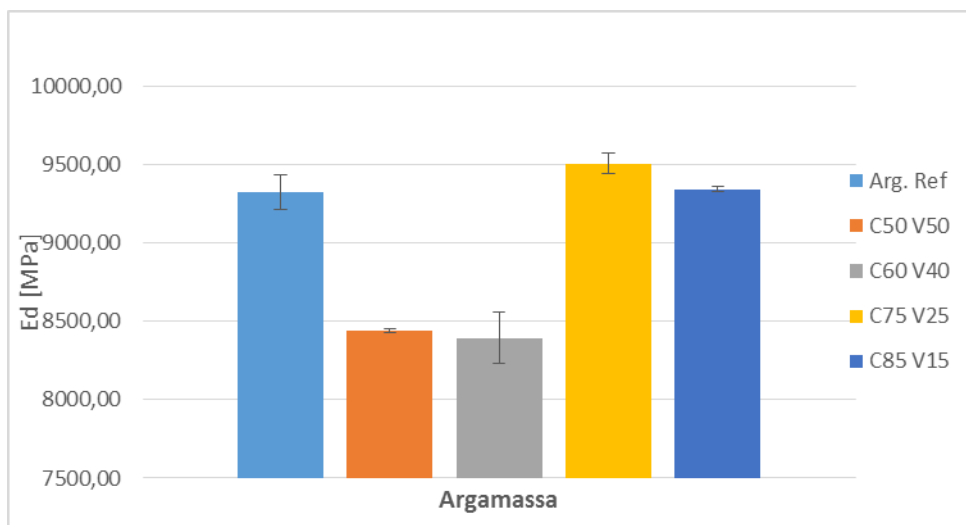


Figura 5.33. Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias.

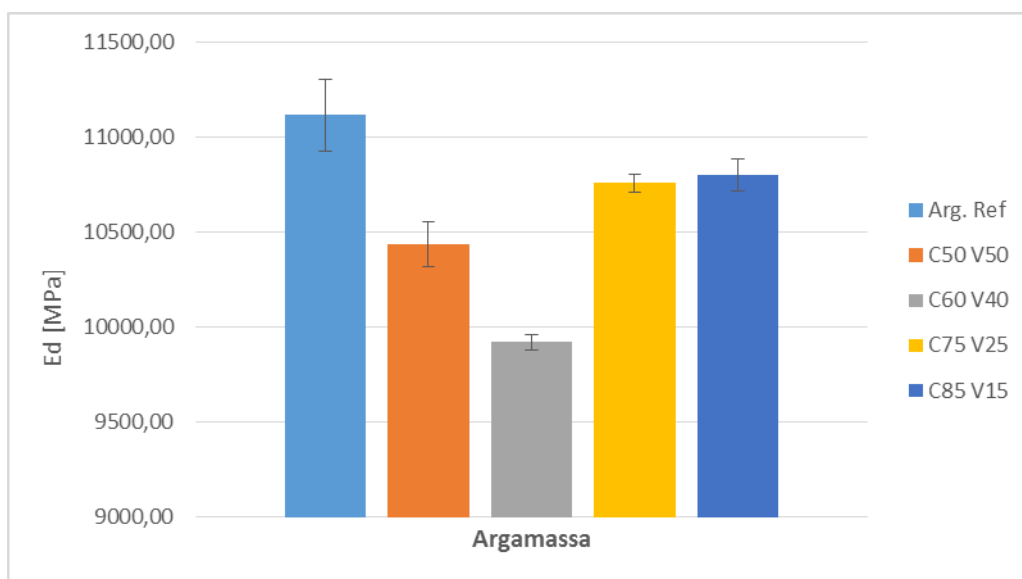


Figura 5.34. Módulo de elasticidade dinâmico aos 63 dias.

Na figura 5.33 observa-se que o módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas C50 V50 e C60 V40 são inferiores aos restantes. Verifica-se que para a argamassa C75 V25 o valor do módulo é semelhante ao da argamassa de referência.

Para o módulo de elasticidade dinâmico aos 63 dias, representado na figura 5.34, verifica-se que a argamassa de referência apresenta valor superior as restantes argamassas. Contudo, continua-se a constatar que para as argamassas C50 V50 e C60 V40 o valor do módulo é inferior.

Relativamente às idades das argamassas existe um aumento do módulo de elasticidade dinâmico aos 63 dias.

5.3.2.3 Determinação da absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade permite conhecer a suscetibilidade das argamassas face aos fenómenos de transporte de humidade e pode ser utilizado com um parâmetro de durabilidade.

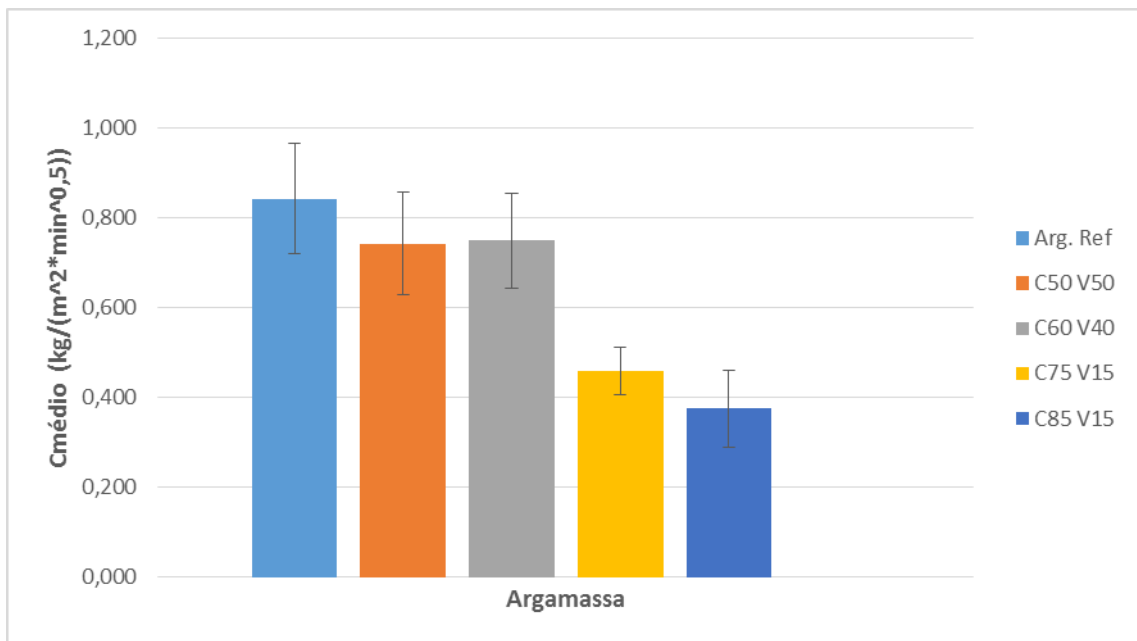


Figura 5.35. Ensaio Capilaridade 28 dias

Pela figura 5.35, observa-se que a argamassa de referência apresenta um coeficiente de absorção de água semelhante ao das argamassas C50V50 e C60V40. Os menores valores do coeficiente de capilaridade aos 28 dias foram obtidos pelas argamassas C75V25 e C85V15, que aliás apresentam valores semelhantes entre si.

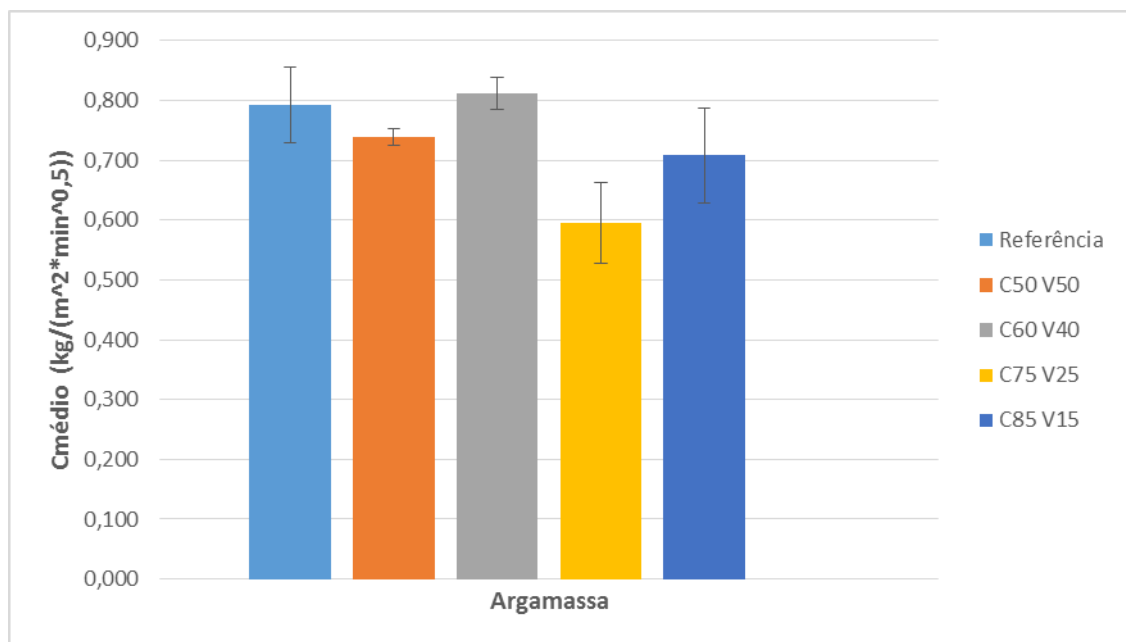


Figura 5.36. Ensaio Capilaridade 63 dias

Relativamente ao ensaio de capilaridade aos 63 dias, representado na figura 5.36, observa-se que o coeficiente de absorção de água das argamassas de referência, da C50V50 e C60V40 continuam muito similares. Verifica-se também que a argamassa C75V25 continua a ter um coeficiente inferior ao da argamassa de referência.

Em comparação aos ensaios realizados a 28 e 63 dias, pode-se observar que os valores não diferem muito, com exceção das argamassas C75V25 e C85 V15 que apresentaram um aumento do coeficiente de absorção aos 63 dias na ordem de 30% e 80% respectivamente.

5.3.2.4 Resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado com a necessidade de perceber a aderência das argamassas de cal ao substrato onde estavam aplicadas. Para a realização deste ensaio recorreu-se a tijolos cerâmicos. Em cada tijolo foram realizados dois corpos de prova para cada uma argamassa. Na figura 5.37 apresenta-se os resultados obtidos.

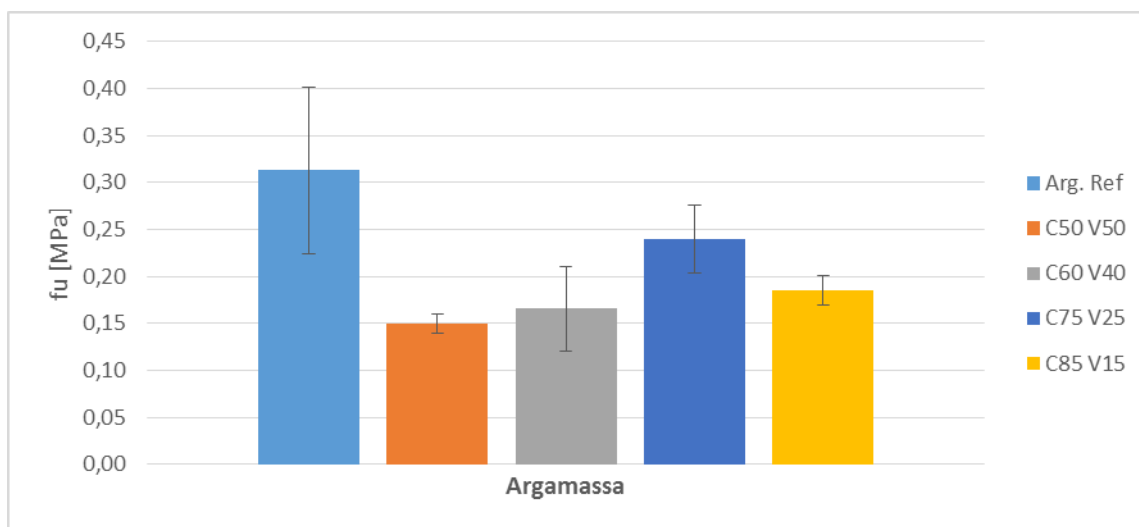


Figura 5.37 Resistência de aderência à tração

Conforme se verifica pela figura 5.37, a argamassa de referência é a que apresenta maior resistência de aderência à tração. Em relação as argamassas com vidro incorporado observa-se que a argamassa C75 V15 mostra uma resistência de aderência superior.

Verificou-se também que nas argamassas C60 V40 sofreram fissuras no processo de carotagem e as argamassas C75 V25 e C85 V15 fissuram durante o processo de cura de 28 dias. Foi também observado, que um dos suportes, nomeadamente a argamassa de referência “arrancou” uma pequena parte do tijolo cerâmico. Verifica-se que o tipo de rotura foi pelo suporte em todos os corpos de prova.

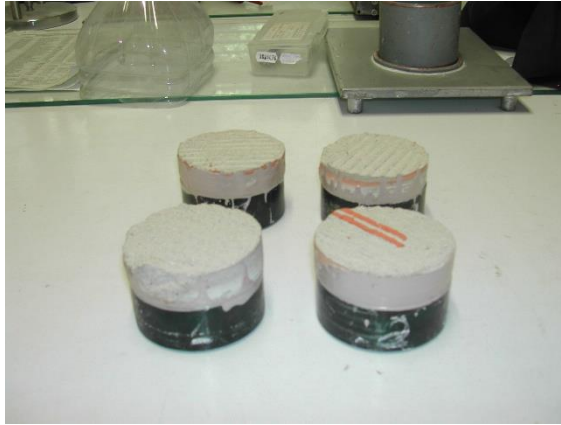


Figura 5.38. Carotes da argamassa de referência

6. Conclusões e propostas futuras

6.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento de uma argamassa de alvenaria à base de aglomerante hidróxido de cálcio-sílica, de forma a definir uma composição ótima da mistura binária e definir as características das argamassas.

Numa primeira fase, realizou-se o estudo reológico de diferentes percentagens de pastas de cal/vidro para obter a melhor otimização da mistura. Conclui-se com o aumento dos finos e com o carácter impermeável do vidro tenha aumentado a tensão de cedência e a viscosidade, sendo por isso a pasta C50V50 a mais favorável.

Para comprovar os resultados reológicos, avaliou-se as pastas pelos métodos de difração de raio X (XRD) e pela análise termogravimétrica (ATG). Pelo DRX, verifica-se com o aumento da substituição de cal por vidro existe uma diminuição da portlandite acompanhada por um aumento da calcite. Isto pode ser devido à variação do grau de ocorrência da reação pozolânica que é maior onde se deteta menores quantidades de portlandite por reagir. A pasta C50V50 é a que apresenta menores picos de intensidade de portlandite comparativamente as outras pastas. Na análise pelo ATG verifica-se também que com o aumento de cal nas argamassas diminui as perdas devidas a desidroxilação e a descarbonatação aos 28 dias, sendo que as perdas por desidroxilação são maiores que as perdas por descarbonatação. Para a pasta C50 V50 a percentagem de perda de massa devido a desidratação da portlandite é superior em relação as outras pastas o mesmo acontece para a descarbonatação da calcite.

Na segunda parte experimental desta dissertação iniciou-se pelo estudo reológico das argamassas de cal com incorporação de vidro. Da análise que se faz dos gráficos obtidos, verifica-se que as argamassas de cal tem uma elevada viscosidade, isto deve-se a dimensão das partículas das argamassas. Quanto maior for a viscosidade melhor trabalhabilidade terá a argamassas. Este fato é comprovado pelo ensaio de consistência pela mesa de espalhamento.

Relativamente aos ensaios mecânicos a argamassa de referência apresentou, em geral, valores superiores aos das argamassas com incorporação de vidro. Contudo houve argamassas com incorporação de vidro que apresentaram valores muito próximos aos de referência.

Pode-se concluir através dos resultados obtidos que a melhor argamassas para alvenarias de revestimentos, e a percentagem de C50%V50%

6.2 Propostas futuras

Tendo em vista os resultados obtidos e as análises possíveis, surgiram a necessidade de esclarecer algumas questões que sugerem a necessidade de estudos futuros. Dentre eles apresenta-se aqui alguns temas possíveis:

Estudo sobre o comportamento reológico de argamassas à base de cal aérea enfocando o seu caráter reopético.

Estudo sobre pastas e argamassas de pó de vidro e cal hidráulica.

Estudo de pastas ternárias e argamassas com base na incorporação de pó de vidro.

Referências Bibliográficas

- [1] V. M. Fragata, A., Veiga, M. R., Velosa, A. L., Ferreira, “Incorporação de resíduos de vidro em argamassas de revestimento- avaliação da sua influencia nas características da argamassa,” in *2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*, 2007.
- [2] A. C., “Estudo da Evolução do Desempenho no Tempo de Argamassas de Cal Aérea - Dissertação de mestrado em Engenharia Civil,” IST, Lisboa, 2008.
- [3] J. Alvarez, C. Sequeira, and M. Costa, “Ensinamentos a retirar do passado história das argamassas.,” in *1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*, APFAC, 2005.
- [4] A. Moropoulou, A. Bakolas, and S. Anagnostopoulou, “Composite materials in ancient structures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 295-300, Feb. 2005.
- [5] C. Sabbioni, A. Bonazza, and G. Zappia, “Damage on hydraulic mortars: the Venice Arsenal,” *J. Cult. Herit.*, vol. 3, no. 1, pp. 83-88, Apr. 2002.
- [6] J. Lanas, J. L. Pérez Bernal, M. A. Bello, and J. I. Alvarez Galindo, “Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 12, pp. 2191-2201, Dec. 2004.
- [7] R. G. Blezard, “The History of Calcareous Cements,” in “*Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*,” 4º Ed., Butterworth Heinemann, England, 1998.
- [8] P. Degryse, J. Elsen, and M. Waelkens, “Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 9, pp. 1457-1463, Sep. 2002.
- [9] A. Moropoulou, A. S. Cakmak, G. Biscontin, A. Bakolas, and E. Zendri, “Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses : The crushed brick/lime mortars of Justinian’s Hagia Sophia,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 16, no. 8, pp. 543-552, 2002.
- [10] J. Lanas and J. I. Alvarez-Galindo, “Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 1867-1876, Nov. 2003.
- [11] J. Appleton, *Reabilitação de Edifícios Antigos - Patologias e Tecnologias de Intervenção*. Amadora: Edições Orion, 2003.

- [12] R. Veiga and F. Carvalho, “Revestimentos de paredes em edifícios antigos.,” in *Cadernos de Edifícios, número 2*, Lisboa: LNEC, 2002.
- [13] R. Veiga and M. Tavares, “Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura.,” in *Actas do Encontro: A indústria das tintas no início do século XXI.*, 2002.
- [14] L. S. R. G. Cavaco, “Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho.,” IST/UTL, Lisboa, 2005.
- [15] P. Barroca, “Comportamento reológico e mecânico de argamassas com agregados leves.,” Universidade da Beira Interior, 2013.
- [16] A. P. Pinto and A. Gomes, “Degradação e Conservação de Materiais I. Argamassas. 1º Curso de formação avançada em Recuperação e Conservação do Património Construído,” *Dep. Eng. Civ. IST/UTL*.
- [17] M. P. Faria, “Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes.,” FCT/UNL, Lisboa, 2004.
- [18] A. de S. Coutinho, *Fabrico e propriedades do betão, volume 1*. Lisboa: LNEC, 1997.
- [19] I. P. da Q.- IPQ, “NP EN 197-1:2012 - norma portuguesa : Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.,” in *NP EN 197-1:2012*, Caparica, 2012.
- [20] J. P. C. G. and P. S. L.A. Pereira de Oliveira, “Optimization of Pozzolanic Reaction of Ground Waste Glass Incorporated in Cement Mortars,” in *Portugal SB07. Sustainable Construction, Materials and Practices. Challenge of the Industry for the New Millennium, Part 2.*, L. Bragança et al. (Eds.), Ed. IOS Press, 2007, pp. 928-934.
- [21] A. Martins, “Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco.,” IST, Lisboa, 2008.
- [22] M. R. Veiga, “Comportamento de argamassas de revestimentos de paredes: Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação.,” LNEC, Lisboa, 1998.
- [23] A. International, “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime,” in *ASTM C593-95(2000)*, 2000.
- [24] R. M. Netto, “Materias Pozolânicos,” UFMG, Brasil, 2006.

- [25] M. P. de Oliveira and N. P. Barbosa, "Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas," *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 10, no. 2, pp. 490-496, Jun. 2006.
- [26] A. Velosa, "Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas," Universidade de Aveiro, 2006.
- [27] A. International, "Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.," in *ASTM C618-01 standard*, C09.24, Subcommittee:, 2001.
- [28] L. A. Pereira-de-Oliveira, J. P. Castro-Gomes, and P. M. S. Santos, "The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 197-203, Jun. 2012.
- [29] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, and H. Wang, "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 5, pp. 987-993, May 2005.
- [30] S. Marques, "Estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos," Universidade de Aveiro, 2005.
- [31] A. Z. Coelho, S. Jalali, and F. P. Torgal, *A cal na construção*. 2009, p. 130.
- [32] R. . Dheilly, J. Tudo, Y. Sebaibi, and M. Quéneudec, "Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca(OH)_2 ," *Constr. Build. Mater.*, vol. 16, no. 3, pp. 155-161, Apr. 2002.
- [33] H. F. W. Taylor, "Identification of the cementing material in a light-weight sand-lime block," *J. Appl. Chem.*, vol. 2, no. 1, pp. 3-5, May 2007.
- [34] F. Pelisser, P. J. P. Gleize, and A. Mikowski, "Propriedades nanomecânicas do silicato de cálcio hidratado de síntese," *Ambient. Construído*, vol. 9, no. 42, pp. 129-139, 2009.
- [35] E. C. for Standardization, "Methods of test for mortar for masonry. Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)," in *EN STANDARDS: EN 1015-1*, 1998.
- [36] I. P. da Q. - IPQ, "NP EN 1008:2003 - norma portuguesa : Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão.," in *NP EN 1008:2003*, Caparica: Instituto Português da Qualidade - IPQ, 2003.

- [37] E. C. for Standardization, "Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars," in *EN STANDARDS: EN 1015-2*, 1998.
- [38] E. C. for Standardization, "Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)," in *EN STANDARDS: EN 1015-3*, 1999.
- [39] E. C. for Standardization, "Methods of test for mortar for masonry. Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar," in *EN STANDARDS: EN 1015-8*, 1999.
- [40] E. C. for Standardization, "Methods of test for mortar for masonry Part 4: Determination of consistence of fresh mortar (by Plunger penetration)," in *EN STANDARDS: EN 1015-4*, 1999.
- [41] E. C. for Standardization, "Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.," in *EN STANDARDS: EN 1015-11*, 1999.
- [42] I. P. da Q.- IPQ, "NP EN 12504-4:2007 - norma portuguesa : Ensaio do betão nas estruturas Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons," in *NP EN 12504-4:2007*, Caparica, 2007.
- [43] E. C. for Standardization, "Methods of test for mortar for masonry Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar," in *EN STANDARDS: EN 1015-18*, 2002.
- [44] E. C. for Standardization, "Methods of test for mortar for masonry Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates," in *EN STANDARDS: EN 1015-12*, 2000.
- [45] PAIVA, Helena - *Caracterização reológica de argamassas* - Tese de mestrado. Universidade de Aveiro, 2005.
- [45] CARDOSO, Fábio (2009) - *Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico*. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo - Escola Politécnica - São Paulo.

Anexos

Anexo I: Ficha técnica: Cal hidratada CL 80 S

CAL HIDRATADA

Descrição do produto:

Cal hidratada superventilada, resulta da hidratação da cal viva obtida de um calcário de elevada pureza (CaCO_3).

Campo de utilização na construção civil e obras públicas:

- Argamassas de reboco e assentamento;
- Pinturas;
- Estabilização de solos de estradas, aeroportos, caminhos de ferro, parques de estacionamento;
- Enriquecimento de misturas estéticas.

Fornecimento e estocagem:

A cal hidratada é fornecida em sacos de 22 kg, sobre paletes ou a granel em camião-cisterna.
Armazenar em lugar fresco, seco e não ventilado. Manter as embalagens invioladas.

Qualidade e assistência:

Uma unidade produtiva dotada das melhores tecnologias disponíveis no sector, garante uma elevada produtividade e um constante controlo sobre o processo produtivo.

A qualidade é garantida por controlos diários em laboratório interno. O nosso pessoal técnico está qualificado e disponível para prestar assistência e aconselhamento técnico.

Higiene e segurança:

Durante o manuseamento do produto, recomenda-se o uso de máscara anti-poeiras e de luvas. Caso ocorra contacto com a vista, lavar abundantemente em água corrente. Consultar a ficha de segurança.

Dados técnicos (NPEN 459):

Classificação: CL 80 S
Pureza média: 90% Ca(OH)_2
Peso específico: 1100 kg/m³
pH: 12
Humidade: < 0,1%

Advertência:

Os dados aqui publicados, são fruto de experiências em obra e em laboratório. As notas técnicas e todas as outras indicações devem considerar-se apenas como puramente indicativas e são fornecidas de modo a contribuírem para um correcto e mais apropriado emprego do produto; o utilizador é totalmente responsável em relação a utilização que faça do produto.



Apresentação:
Saco de 22 kg

CALCIDRATA
INDÚSTRIAS DE CAL, S.A.

Sabrosa S. de Odivelas,
Pa da Pedreira,
2025-101 Alcanede,
Santarem Portugal

Teléfono
(+351) 243 481 020
Téléphone
(+351) 076 403 938
Fax
(+351) 243 481 020

E-mail
calcidrata@calcidrata.pt
www.calcidrata.pt

CAL HIDRATADA

Anexo II: Ficha técnica: Cimento CEM II/B-L 32,5N

CEM II/B-L 32,5N

Cimento Portland de Calcário



Locais de Produção

Fábrica Sedl-Quiló
Fábrica Olina-Peixeiro
Fábrica Macieira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40 kg
Sacos de 25 kg

Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0100, 0856-CPD-0131 e 0856-CPD-0132.

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

65% a 75% Cimento Portland
21% a 35% Calcário
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5N é o cimento mais utilizado nas obras de construção civil. A sua excelente trabalhabilidade e baixo calor de hidratação tornam-no especialmente adaptado a todos os trabalhos correntes da construção.

O cimento CEM II/B-L 32,5N é principalmente utilizado em:

- argamassas e betão não armado para enchimentos e regularização;
- betão estrutural, pronto ou fabricado em obra de média resistência;
- argamassas de assentamento, reboco e reparação;
- fundações directas e indirectas em ambientes moderadamente agressivos;
- estabilização de solos e solo-cimento;
- prefabricação de blocos, tubos, manilhas e outros artefactos à base de cimento;
- prefabricação ligeira em regime de baixa rotatividade de moldes.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com menor calor de hidratação e melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência.

Desenvolvimento mais lento de resistências (menor resistência inicial).

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

Advertências Específicas

Este cimento melhora a trabalhabilidade de betões e argamassas e permite uma redução da dosagem de água de amassadura. Porém, o correcto desenvolvimento de resistências é sensível ao processo de cura pelo qual deverão ser tomadas precauções para evitar a dissecação de peças betonadas muito expostas ao sol e ao vento (possível fendilhação).

Não se recomenda a utilização deste cimento em tempo muito frio, sem que se tomem medidas adequadas.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

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

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfato (em SO ₃)	NPEN 196-2	≤ 0,5%
Teor de Cloratos	NPEN 196-21	≤ 0,10%

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

Características Mecânicas

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

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Pressa	NPEN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade	NPEN 196-3	≤ 10 mm



Habituação a outros
comprimentos.
Quinta da Cabrinha, Lisboa.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 4ª
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 - Fax. 217 926 200

Vendas Norte
Tel. 226 070 410 - Fax. 226 070 411

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

Vendas Sul
Tel. 212 198 200 - Fax. 212 198 229

Orçamento
Tel. 244 507 700 - Fax. 244 509 600

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 200 - Fax. 212 198 229

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

Anexo III Tabelas

Determinação da consistência no penetrometro EN 1015-4 [mm]					
Argamassa	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	Média	DV
Ref	7	6	8	7,00	1,00
C50 V50	4	3	5	4,00	1,00
C60 V40	5	4	5	4,67	0,58
C75 V25	9	5	4	6,00	2,65
C85 V15	8	6	8	7,33	1,15

Determinação da massa Volúmica e do teor de ar EN 1015-6				
Argamassa	V (l)	m1 (g)	m2 (g)	ρ
Ref	1,2	1309,6	3738,7	2024
C50 V50	1,2	1306,7	3755,7	2040,8333
C60 V40	1,2	1306,8	3732,8	2021,6667
C75 V25	1,2	1306,7	3692	1987,75
C85 V15	1,2	1307	3661,8	1962,3333

Ensaio Flexão (kN) : EN 1015-11 28 dias										
	F [KN]	F [N]	l[m]	b[m]	d[m]		f [Pa]	f [Mpa]	Media	DP
Arg. Ref	0,786	78,6	0,1	0,04	0,04	1,5	184218,75	0,1842188	0,164141	0,019
	0,69	69					161718,75	0,1617188		
	0,625	62,5					146484,38	0,1464844		
C50 V50	0,33	33					77343,75	0,0773438	0,089766	0,012
	0,389	38,9					91171,875	0,0911719		
	0,43	43					100781,25	0,1007813		
C60 V40	0,418	41,8					97968,75	0,0979688	0,082578	0,014
	0,31	31					72656,25	0,0726563		
	0,329	32,9					77109,375	0,0771094		
C85 V15	0,5	50					117187,5	0,1171875	0,110156	0,023
	0,55	55					128906,25	0,1289063		
	0,36	36					84375	0,084375		
C75 V25	0,44	44	103125	0,103125	0,098438	0,008				
	0,44	44	103125	0,103125						
	0,38	38	89062,5	0,0890625						

Ensaio Flexão (kN) : EN 1015-11 63 dias										
	F [KN]	F [N]	l[m]	b[m]	d[m]		f [Mpa]		Media	DP
Arg. Ref	0,645	64,5	0,1	0,04	0,04	1,5	151171,9	0,151172	0,17	0,02
	0,71	71					166406,3	0,166406		
	0,812	81,2					190312,5	0,190313		
C50 V50	0,532	53,2					124687,5	0,124688	0,15	0,02
	0,697	69,7					163359,4	0,163359		
	0,635	63,5					148828,1	0,148828		
C60 V40	0,45	45					105468,8	0,105469	0,12	0,02
	0,572	57,2					134062,5	0,134063		
	0,577	57,7					135234,4	0,135234		
C85 V15	0,62	62					145312,5	0,145313	0,16	0,01
	0,735	73,5					172265,6	0,172266		
	0,652	65,2					152812,5	0,152813		
C75 V25	0,493	49,3					115546,9	0,115547	0,12	0,02
	0,447	44,7					104765,6	0,104766		
	0,585	58,5					137109,4	0,137109		

Compressão 28 dias						
	F [KN]	F [N]	Ac[mm^2]	f [Mpa]	Media	DP
Arg. Ref	8,01	801	1600	0,501	0,49	0,01
	7,62	762		0,476		
	7,78	778		0,486		
C50 V50	4,72	472		0,295	0,29	0,01
	4,47	447		0,279		
	4,63	463		0,289		
C60 V40	3,61	361		0,226	0,24	0,01
	3,84	384		0,240		
	4,02	402		0,251		
C85 V15	4,15	415		0,259	0,25	0,01
	3,96	396		0,248		
	4,12	412		0,258		
C75 V25	3,24	324		0,203	0,21	0,01
	3,47	347		0,217		
	3,46	346		0,216		

Compressão 63 dias						
	F [KN]	F [N]	Ac[mm ²]	f [Mpa]	Media	DP
Arg. Ref	7,9	790	1600	0,494	0,54	0,06
	8,27	827		0,517		
	9,8	980		0,613		
C50 V50	7,05	705		0,441	0,45	0,01
	7	700		0,438		
	7,41	741		0,463		
C60 V40	6,27	627		0,392	0,37	0,03
	5,45	545		0,341		
	6,01	601		0,376		
C85 V15	6,08	608		0,380	0,39	0,01
	6,3	630		0,394		
	6,31	631		0,394		
C75 V25	5,5	550		0,344	0,38	0,03
	6,43	643		0,402		
	6,19	619		0,387		

Módulo de elasticidade dinámico 28 dias								
	Tempo	L	ρ	V	μ	Ed	Edm	DV
	μ s	mm	Kg/m ³	Km/s		Mpa	Mpa	
Arg. Ref	76,7	180,00	1898,60	2,35	0,2	9410,88	9322,24	113,84
	76,9	180,00	1898,60	2,34	0,2	9361,99		
	77,6	180,00	1898,60	2,32	0,2	9193,85		
C50 V50	78,3	180,00	1776,39	2,30	0,2	8448,94	8441,76	12,44
	78,3	180,00	1776,39	2,30	0,2	8448,94		
	78,4	180,00	1776,39	2,30	0,2	8427,40		
C60 V40	80,1	180,00	1874,31	2,25	0,2	8518,52	8393,93	163,94
	81,6	180,00	1874,31	2,21	0,2	8208,21		
	80,4	180,00	1874,31	2,24	0,2	8455,06		
C75 V25	75,5	180,00	1844,79	2,38	0,2	9437,14	9504,37	63,52
	75,2	180,00	1844,79	2,39	0,2	9512,59		
	75	180,00	1844,79	2,40	0,2	9563,39		
C85 V15	73,8	180,00	1746,18	2,44	0,2	9348,97	9340,54	14,60
	73,9	180,00	1746,18	2,44	0,2	9323,69		
	73,8	180,00	1746,18	2,44	0,2	9348,97		

Módulo de elasticidade dinámico 63 dias

	Tempo	L	ρ	V	μ	Ed	Edm	DV
	μs	mm	Kg/m ³	Km/s		Mpa	Mpa	
Arg. Ref	68,7	180,00	1811,46	2,62	0,2	11191,87	11117,83	187,80
	68,5	180,00	1811,46	2,63	0,2	11257,32		
	69,6	180,00	1811,46	2,59	0,2	10904,30		
C50 V50	70,9	180,00	1775,35	2,54	0,2	10298,62	10436,23	119,17
	70,2	180,00	1775,35	2,56	0,2	10505,03		
	70,2	180,00	1775,35	2,56	0,2	10505,03		
C60 V40	71,6	180,00	1742,70	2,51	0,2	9912,52	9921,85	42,40
	71,7	180,00	1742,70	2,51	0,2	9884,89		
	71,4	180,00	1742,70	2,52	0,2	9968,13		
C75 V25	69	180,00	1748,61	2,61	0,2	10709,82	10761,86	47,72
	68,8	180,00	1748,61	2,62	0,2	10772,18		
	68,7	180,00	1748,61	2,62	0,2	10803,56		
C85 V15	68,9	180,00	1774,30	2,61	0,2	10898,74	10804,76	82,85
	69,4	180,00	1774,30	2,59	0,2	10742,26		
	69,3	180,00	1774,30	2,60	0,2	10773,28		

Pull off : EN 1015-12

	Kg	F [N]	Area[m²]	fu [MPa]	media	DP
Arg. Ref	110,42	1082,116	4418	0,2449335	0,31	0,09
	192,04	1881,992		0,4259828		
	154,38	1512,924		0,3424455		
	107,82	1056,636		0,2391661		
C50 V50	69,68	682,864		0,1545641	0,15	0,01
	71,54	701,092		0,1586899		
	60,58	593,684		0,1343785		
	68,58	672,084		0,152124		
C60 V40	57,45	563,01		0,1274355	0,17	0,05
	72,48	710,304		0,160775		
	103,9	1018,22		0,2304708		
	65,54	642,292		0,1453807		
C75 V25	90,74	889,252		0,2012793	0,24	0,04
	100,02	980,196		0,2218642		
	113,2	1109,36		0,2511		
	128,02	1254,596		0,2839737		
C85 V15	74,88	733,824	0,1660987	0,18	0,02	
	90,44	886,312	0,2006139			
	80,48	788,704	0,1785206			
	87,68	859,264	0,1944916			

