



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

Comportamento reológico e mecânico de argamassas com agregados finos reciclados de resíduos de vidro

Tomás Fidalgo Peixeiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(Ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Luiz Antonio Pereira de Oliveira

(DECA-UBI/UniCeuma)

Covilhã, Outubro de 2016

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação apenas foi possível graças a muito esforço e dedicação. Contudo, sem a ajuda de algumas pessoas não seria possível que a tivesse realizado nem concluído.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira, agradeço todo o apoio e orientação ao longo de todo o processo de execução da dissertação. Apesar da distância e das limitações que isso traz, sempre se mostrou disponível para sempre que possível esclarecer as minhas dúvidas e fazer correções e observações de forma a melhorar todo o meu trabalho.

À Sara Brito, minha amiga e companheira de laboratório, agradeço toda a sua ajuda e companheirismo e sem a qual a parte experimental deste trabalho teria sido bastante mais trabalhosa, demorada e aborrecida.

Ao Sr. António Félix, técnico de laboratório, agradeço toda a disponibilidade e ajuda demonstrada em todo o trabalho laboratorial e sem o qual não seria possível realizar muitos dos ensaios.

Agradeço a todos os cafés do Tortosendo e Covilhã que facultaram garrafas de vidro para que pudessemos ter matéria-prima para a execução do trabalho.

A todos os amigos que fiz ao longo deste percurso académico, agradeço-lhes por toda a ajuda, companheirismo e amizade e por fazerem com que estes anos se tornassem um pouco mais fáceis e também que façam com que deixem saudades.

Aos meus amigos Suris agradeço toda a amizade de uma vida e por estarem sempre presentes em tudo, nos bons e nos maus momentos, e não só no percurso académico mas que com a sua presença também fizeram com que conseguisse ultrapassar todos os obstáculos que me foram apresentados ao longo destes 7 anos.

Agradeço à minha família que sempre me apoiou em todos os aspetos do meu percurso académico e que me proporcionou esta minha formação para o futuro. Agradeço em especial à minha avó, a quem dedico esta dissertação e que sei que tem orgulho em eu a ter concluído.

Resumo

COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS FINOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE VIDRO

As argamassas desempenham um papel bastante importante na construção. As suas propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido merecem ser foco de estudo para que estas se tornem cada vez mais eficientes, seja a nível de segurança, de funcionalidade ou de economia. De forma a melhorar a economia deste material, a substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos reciclados de resíduos de vidro apresenta-se como uma solução sustentável tanto a nível económico como ambiental. No presente trabalho estuda-se a influência da introdução destes agregados no desempenho mecânico e reológico das argamassas.

Para o estudo do comportamento mecânico e reológico das argamassas com substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado foi utilizada uma argamassa de referência com agregados finos convencionais de traço em massa cimento:areia de 1:3 (cimento Portland CEM I 32,5R e areia natural do rio Tejo 0/4) cuja quantidade de água foi ajustada para se obter a consistência pretendida no ensaio de consistência (*flow table*). Mantendo as mesmas proporções, foram depois criadas argamassas com substituições de 50%, 75% e 100% de agregados finos de areia natural por agregados finos reciclados de vidro.

O estudo das argamassas no estado fresco foi feito através dos ensaios de consistência por espalhamento ou *flow table*, do ensaio de massa volúmica aparente e do ensaio reológico com recurso ao Reómetro Viskomat NT. Já no estado endurecido os ensaios realizados foram o ensaio de ultrassons, de resistência mecânica à flexão e a compressão, de absorção de água por capilaridade, de massa volúmica e de absorção de água.

A substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado torna as argamassas mais fluídas e menos consistentes, pelo que se deve ter em atenção a quantidade de água e se necessário aumentá-la. No estado endurecido, as argamassas com agregados de vidro apresentam um desempenho mecânico aceitável e dentro das normas. Porém, observou-se maiores valores de absorção de água e de coeficiente de capilaridade.

Palavras-chave:

Argamassa; areia natural; agregados finos reciclados de vidro; reologia; comportamento mecânico.

Abstract

RHEOLOGICAL AND MECHANICAL BEHAVIOR OF MORTARS WITH FINE RECYCLED GLASS AGGREGATES

Mortars play a very important role in construction. The study of their properties both in their fresh state and hardened state deserves to be focus of study so that these became increasingly efficient whether on safety, functionality or economy. In order to make mortars that are more economical, the replacement of fine sand aggregates with fine recycled glass aggregates presents itself as a sustainable solution on economic and environmental levels. In this work is aimed to study the influence of the introduction of this aggregates on the mechanical and rheological behavior of mortars.

To study the mechanical and rheological behavior of mortars with a percentage of fine sand aggregates replaced by fine recycled glass aggregates, it has been created a reference mortar without any glass aggregates. It has a ratio of cement:sand of 1:3 (Portland cement CEM I 32,5R and natural sand 0/4 from river Tejo) whose amount of water has been adjusted to obtain the desire consistency on the flow table test. Keeping the same proportions, were created mortars with 50%, 75% and 100% of fine sand aggregates replaced by fine recycled glass aggregates.

The study of mortars on their fresh state was made through the tests of flow table, apparent density and rheological test using the Rheometer Viskomat NT. On the hardened state of mortars, the tests that were made were the ultrasonic test, flexure and compressive strengths, water absorption by capillarity, density and water absorption.

The replacement of fine sand aggregates with fine recycled glass aggregates makes mortars more fluid and less consistent, so it should be taken in account the amount of water and increase it if necessary. On the hardened state, mortars with glass aggregates have a decent mechanical performance within regulations. It has been observed an increase in the values of water absorption and capillarity coefficient.

Keywords

Mortar; fine sand aggregates; fine recycled glass aggregates; rheology; mechanical behavior.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objetivos e justificação do tema	2
1.3. Organização da dissertação	2
2. Argamassas com agregados finos reciclados de vidro	4
2.1. Introdução	4
2.2. O material vidro	4
2.2.1. Pozolanicidade	6
2.3. O vidro como agregado fino em betões e argamassas	6
2.3.1. Propriedades no estado fresco	6
2.3.2. Propriedades no estado endurecido	7
2.3.3. Durabilidade	8
2.4. Exigências normativas das argamassas	12
2.4.1. Materiais constituintes	12
2.4.2. Argamassas no estado endurecido	12
2.4.3. Argamassas no estado fresco	14
3. Reologia de argamassas	15
3.1. Introdução	15
3.2. Reologia	16
3.3. Parâmetros reológicos	17
3.4. Modelos de caracterização reológica	18
3.5. Estudos realizados no âmbito da reologia de argamassas	19
4. Procedimento experimental	22
4.1. Introdução	22
4.2. Materiais utilizados	22
4.2.1. Cimento	22
4.2.2. Agregados finos	23
4.2.3. Água de amassadura	23
4.3. Ensaios de caracterização dos materiais	23
4.3.1. Análise granulométrica	23
4.4. Composição das argamassas estudadas	25
4.5. Procedimento de mistura	26

4.6. Ensaio no estado fresco	27
4.6.1. Consistência por espalhamento ou <i>flow table</i>	27
4.6.2. Ensaio de massa volúmica aparente	28
4.6.3. Ensaio reológico	29
4.7. Ensaio no estado endurecido	30
4.7.1. Preparação e condicionamento dos provetes.....	31
4.7.2. Ensaio de ultrassons	32
4.7.3. Resistência à flexão	33
4.7.4. Resistência à compressão.....	34
4.7.5. Absorção de água por capilaridade	35
4.7.6. Massa volúmica	35
4.7.7. Absorção de água	37
5. Apresentação e discussão de resultados	38
5.1. Introdução	38
5.2. Caracterização das argamassas no estado fresco.....	38
5.2.1. Consistência por espalhamento ou <i>flow table</i>	38
5.2.2. Ensaio de massa volúmica aparente	39
5.3. Caracterização reológica das argamassas.....	40
5.4. Caracterização das argamassas no estado endurecido	45
5.4.1. Ensaio de ultrassons	45
5.4.2. Resistência mecânica à flexão	46
5.4.3. Resistência mecânica à compressão	47
5.4.4. Absorção de água por capilaridade	48
5.4.5. Massa volúmica	50
5.4.6. Absorção de água	51
6. Conclusões.....	53
6.1. Conclusões.....	53
6.2. Propostas para trabalhos futuros.....	55
Referências bibliográficas.....	56
Anexos	62

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura tridimensional de SiO_4	5
Figura 2 - Estrutura bidimensional de SiO_4	5
Figura 3 - Resistência à compressão de misturas com areia de vidro, aos 7 e 28 dias de idade (Oliveira et al. 2008)	8
Figura 4 - Coeficiente de capilaridade de diferentes misturas de betão aos 28 e 63 dias (Oliveira et al. 2008).....	9
Figura 5 - Coeficiente de permeabilidade ao ar de diferentes misturas de betões aos 28 e 63 dias (Oliveira et al. 2008)	9
Figura 6 - Coeficiente de permeabilidade à água de diferentes misturas de betões aos 28 e 63 dias (Oliveira et al. 2008)	9
Figura 7 - Expansão de corpos de prova de betão imersos em solução de NaOH (Oliveira et al. 2008)	10
Figura 8 - Modelo da atração de Van der Waals para a destruição estrutural irreversível por ações de corte para partículas de cimento (Banfill P.F.G., 2003)	18
Figura 9 - Peneiros sobre a peneiradora mecânica	24
Figura 10 - Pormenor de um peneiro de malha quadrada	24
Figura 11 - Balança de precisão KERN PCP	24
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado de areia de vidro reciclado.....	25
Figura 13 - Constituintes sólidos misturados num tabuleiro de aço inoxidável (cimento ; areia natural e areia de vidro)	26
Figura 14 - Misturadora de argamassas	27
Figura 15 - Argamassa misturada no recipiente de aço inoxidável	27
Figura 16 - Molde cónico sobre o disco de aço inoxidável da mesa <i>flow table</i>	28
Figura 17 - Argamassa espalhada e pronta a ser medida numa direção com auxílio de 2 objetos paralelos.....	28
Figura 18 - Cilindro de 1 dm ³ de capacidade	29
Figura 19 - Reómetro Viskomat NT (a) e computador onde está instalado o <i>software</i> (b)	30
Figura 20 - Perfil de “STEP”	30
Figura 21 - Moldes de 40 x 40 x 160 mm ³ usados para a produção dos provetes	31
Figura 22 - Moldes preenchidos até ao topo com argamassa.....	31
Figura 23 - Câmara de cura	31
Figura 24 - Máquina de ultrassons	32
Figura 25 - Colocação do emissor e do recetor nas extremidades do provete	32
Figura 26 - Prensa de compressão eletrónica.....	33
Figura 27 - Representação esquemática do ensaio de resistência mecânica à flexão (EN 1015-11:1999)	34

Figura 28 - Provetes após a rotura provocada pelo ensaio de resistência mecânica à flexão .	34
Figura 29 - Proвете após a rotura provocada pelo ensaio de resistência mecânica à compressão	34
Figura 30 - Ensaio de absorção de água por capilaridade	35
Figura 31 - Provetes imersos em água durante 24 h.....	36
Figura 32 - Proвете imerso no sistema hidrostático	36
Figura 33 - Massa volúmica aparente das argamassas no estado fresco	40
Figura 34 - Curvas de cedência Torque x Velocidade para todas as argamassas em estudo ...	41
Figura 35 - Torque x Velocidade para a argamassa de referência	42
Figura 36 - Torque x Velocidade para a argamassa com 50% de vidro	42
Figura 37 - Torque x Velocidade para a argamassa com 75% de vidro	42
Figura 38 - Torque x Velocidade para a argamassa com 100% de vidro	43
Figura 39 - Comparação da tensão de cedência (ensaio reológico) com o diâmetro de espalhamento (<i>flow table</i>).....	44
Figura 40 - Módulos de elasticidade dinâmicos.....	46
Figura 41 - Resistência mecânica à flexão das argamassas aos 28 dias	46
Figura 42 - Resistência mecânica à compressão das argamassas aos 28 dias	47
Figura 43 - Coeficientes de capilaridade das argamassas	48
Figura 44 - Absorção capilar das argamassas	49
Figura 45 - Massa volúmica das argamassas no estado endurecido	50
Figura 46 - Teor de absorção de água das argamassas	52

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Requisitos gerais para argamassas no estado endurecido (EN 998-1:2003)	13
Tabela 2 - Síntese dos requisitos específicos para argamassas no estado endurecido (EN 998-1:2003).....	13
Tabela 3 - Principais modelos reológicos	19
Tabela 4 - Percentagens e quantidades de material retido e passado nos peneiros, para a areia de vidro reciclado	25
Tabela 5 - Valores de espalhamento obtidos no ensaio de consistência por espalhamento ou <i>flow table</i>	38
Tabela 6 - Tixotropia relativa das curvas de cedência Torque x Velocidade	41
Tabela 7 - Equações do modelo reológico de Bingham (perfil de “ <i>step</i> ”) e parâmetros reológicos	43
Tabela 8 - Características dos provetes e cálculo da velocidade de propagação da onda ultrassônica	45
Tabela 9 - Valores das massas obtidas no ensaio de massa volúmica no estado endurecido...	50
Tabela 10 - Valores das massas obtidas no ensaio de massa volúmica no estado endurecido .	51

Lista de Acrónimos

ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
MERUC	Masse volumique aparente de l'enduit durci Module d'élasticité Resistance à la traction Rétention d'eau (humidification) Capillarité
NP	Norma Portuguesa
UBI	Universidade da Beira Interior

Simbologia

Alfabeto Latino

C	Coeficiente de capilaridade $\left[\frac{kg}{m^2*min^{0,5}}\right]$
Ca ²⁺	lão de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio (cal)
CS	Compressive Strenght
C-S-H	Silicatos de Cálcio Hidratados
E _d	Módulo de elasticidade dinâmigo [Mpa]
K	Constante dependente do material
M ₁	Massa do provete após 10 minutos de imersão
M ₁	Massa do provete após 90 minutos de imersão
m _{arg}	Massa de 1 dm ³ de argamassa [kg]
m _i	Massa aparente do provete quando imerso no sistema hidrostático [kg]
m _{sat}	Massa saturada do provete [kg]
m _{sec}	Massa seca do provete [kg]
n	Constante dependente do material
Na ₂ O	Óxido de Sódio
SiO ₂	Dióxido de Silício
T	Thermal
T	Torque [N.mm]
T ₀	Tensão de cedência relativa
V	Velocidade
V	Velocidade de propagação da onda ultrassónica [km/s]
V _{arg}	Volume de argamassa [dm ³]
V _p	Volume do provete [m ³]
W	Water

Alfabeto grego

μ	Viscosidade plástica relativa
γ	Taxa de corte
ρ	Massa volúmica da argamassa [kg/m^3]
ρ_p	Massa volúmica do provete [kg/m^3]
ρ_w	Massa volúmica da água [kg/m^3]
τ	Tensão de corte
τ_0	Tensão de cedência relativa
ν	Coefficiente de Poisson

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Uma argamassa pode ser definida como um material de construção que apresenta propriedades de aderência e endurecimento obtidas pela mistura de um ou mais aglomerantes com agregados finos e água.

A primeira vez que foi usado um material de construção que pode ser considerado uma argamassa de assentamento foi por volta de 5000 a.C. na Mesopotâmia, quando foi usada uma mistura de uma lama argilosa com excrementos de gado e palha para colar tijolos. Desde então, civilizações como os egípcios, os gregos ou os romanos têm vindo a melhorar a qualidade das argamassas e também o seu processo de produção (Alvarez, 2007).

Desde a invenção do cimento Portland em 1824, o desenvolvimento de mais e melhores argamassas (e betões) têm sido alvo de bastantes estudos e investigações (Sharp, J. H., 2006). Alguns desses estudos têm sido no sentido de introduzir novos componentes nas argamassas para as tornar não só mais eficientes, mas também mais sustentáveis e ecológicas, usando muitas vezes materiais reciclados.

O World Bank (2012) estima que atualmente as cidades pelo mundo geram cerca de 1.3 mil milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano o que tem um custo anual de 205,4 mil milhões de dólares. Estes números têm tendência para aumentar para as 2.2 mil milhões de toneladas até 2025. Os resíduos de vidro representam cerca de 10,75% desses resíduos.

Em Portugal, diariamente são produzidas 13,616 toneladas de resíduos sólidos urbanos o que representa uma fatura anual de quase 5 milhões de toneladas. Desses resíduos, uma percentagem de 7% são de vidro, ou seja, cerca de 350 mil toneladas por ano. (World Bank, 2012).

De todos os resíduos de vidro que são produzidos, apenas 30% deles são reciclados e reutilizados, o que quer dizer que os restantes são depositados em aterros (Sousa L., 1995). Isto leva a que cada vez seja mais urgente haver uma preocupação de reutilização dos resíduos de vidro. Foi neste sentido que desde a década de 60, vários investigadores começaram a estudar o uso de resíduos de vidro como agregados como foi o caso de Schmidt & Saia (1963), Figg (1981), Shayan & Xu (2004), Oliveira et al. (2007) entre muitos outros.

Várias características das argamassas podem ser estudadas, bem como a influência da introdução do vidro nessas mesmas características. Fatores como a cor, o tamanho, a forma ou a quantidade do vidro vão alterar as exigências funcionais das argamassas tanto no seu estado fresco como no seu estado endurecido.

1.2. Objetivos e justificação do tema

A sustentabilidade é a principal justificação para que se use vidro reciclado na produção de argamassas. Para além de evitar com que se aumente o número de toneladas de vidro que são depositadas em aterros, o facto de se usar um resíduo que de outra forma não seria usado para mais nada, os custos de obtenção desse material são bastante reduzidos, diminuindo os custos de produção das argamassas. Como tal, é fundamental que se façam cada vez mais estudos sobre o uso de vidro na constituição de argamassas para que se torne uma prática corrente e também para que haja garantias de segurança e funcionalidade.

O uso de vidro na produção de argamassas carece ainda muito de fundamentação científica, sendo que o comportamento reológico é aquele sobre o qual há menos estudos realizados, razão pela qual vai ter um grande peso no presente trabalho para que se possa compreender mais um pouco da influência da substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado na reologia das argamassas bem como o seu desempenho mecânico e a sua durabilidade.

Contudo, a reologia não poderia ser estudada isoladamente sem serem abordadas as restantes características das argamassas, pois a importância do estudo do comportamento reológico das argamassas, é perceber a sua influência nas outras características funcionais das argamassas sobre as quais já há um maior conhecimento científico.

Para a realização deste estudo foram produzidas várias argamassas, todas elas com a mesma proporção de cimento Portland (CEM I 32,5R), água e agregados finos. O que se altera entre elas é o tipo de agregados, ou seja, várias proporções de agregados finos de areia natural e de agregados finos de vidro reciclado:

- 100% de areia natural e 0% de vidro reciclado (argamassa de referência);
- 50% de areia natural e 50% de vidro reciclado;
- 25% de areia natural e 75% de vidro reciclado;
- 0% de areia natural e 100% de vidro reciclado.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação apresenta três fases principais para que possam ser atingidos os objetivos propostos, sendo elas a pesquisa e levantamento bibliográfico sobre a temática em estudo a nível nacional e internacional, o estudo laboratorial e por fim análise dos resultados obtidos em laboratório.

No que à estrutura diz respeito, a dissertação está dividida em 6 capítulos, incluindo este em que é feita uma introdução ao tema e também uma breve justificação acerca da escolha deste.

No Capítulo 2 é estudada a bibliografia existente acerca do tema em estudo. É explorado o vidro enquanto material e é feita também uma análise dos resultados obtidos em estudos já realizados acerca do uso de vidro como agregados, tanto em betões como em argamassas. São também apresentadas as exigências normativas que as argamassas devem seguir para que possam ser comparadas com os resultados obtidos.

No Capítulo 3 é também feita uma análise bibliográfica, mas agora sobre a reologia de argamassas correntes e também acerca dos estudos já realizados que dizem respeito à caracterização reológica de argamassas contendo agregados de vidro.

No Capítulo 4 é descrito todo o procedimento experimental adotado para a realização do presente estudo. São descritos todos os constituintes utilizados na produção das argamassas assim como o próprio processo de produção das mesmas para a realização de todos os ensaios, que serão também eles descritos e justificados.

No Capítulo 5 serão apresentados todos os resultados obtidos durante o procedimento experimental, resultados esses que serão também discutidos e analisados.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões do trabalho experimental realizado, apresentando as vantagens e as desvantagens da substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado na produção de argamassas. São também apresentadas propostas para trabalhos futuros nesta área.

2. Argamassas com agregados finos reciclados de vidro

2.1. Introdução

As argamassas desempenham um papel bastante importante na construção, sejam elas de revestimento ou de assentamento. Como tal, torna-se bastante relevante o estudo do comportamento destas em estado fresco ou endurecido, sejam elas argamassas tradicionais ou argamassas com a introdução ou substituição de elementos destas.

A introdução de novos constituintes tem sido uma crescente aposta, tendo em vista a melhoria do desempenho das argamassas e da sua economia. O vidro é um dos constituintes que tem vindo a ser cada vez mais estudado e que tem apresentado alguns resultados satisfatórios quanto à melhoria do comportamento das argamassas. Contudo, os estudos já realizados não são suficientes para que se possa generalizar o uso de vidro na produção de argamassas. Falta ainda que se estabeleçam relações causa/efeito entre as diferentes características do vidro que é introduzido (tamanho, quantidade, forma, cor, etc) e o comportamento das argamassas.

Neste capítulo pretende-se fazer um levantamento dos estudos já realizados acerca desta temática e das conclusões que neles foram retiradas. Há diferentes abordagens que podem ser feitas neste âmbito que aqui serão abordadas de uma forma geral. Serão também apresentadas as exigências normativas que todas as argamassas devem seguir para que possa haver uma comparação com as argamassas estudadas no presente trabalho.

2.2. O material vidro

O vidro pode ser descrito como um material inerte, não cristalino, frágil e não poroso (A. C. P. Galvão et al., 2003). Apesar da sua aparência sólida, nomeadamente devido à sua rigidez mecânica, há uma grande discussão sobre se este deve ser realmente considerado como tal. O facto de ser um material não cristalino é o principal fator para que este não possa ser considerado um sólido, visto que esta é a principal característica que define este estado de matéria. Contudo, é também imprudente incluir o vidro na categoria dos materiais líquidos, ainda que considerando-o um líquido de viscosidade infinita. A terceira designação que é atribuída ao vidro é a de sólido amorfo. Isto quer dizer que é um material que não apresenta ordem molecular a grandes distâncias, ou seja, a uma escala superior a algumas vezes o tamanho dos grupos de moléculas.

É um material que devido à diversidade de composições com as quais é fabricado, pode ser classificado em várias categorias, tais como: sílica vítrea, silicatos alcalinos, vidros sodo-cálcios, vidros de borosilicato, vidros de chumbo, vidros de bário e vidros de silicato de alumínio (Caijun Shi & Keren Zheng, 2007). De todos estes, o vidro sodo-cálcio é o mais usado pela

indústria para o fabrico de recipientes. A cor mais usada é a branca ou incolor (63%), seguida da cor castanha (25%), da cor verde (10%) e da azul ou outras cores (2%) (Caijun Shi & Keren Zheng, 2007), sendo que a composição química de cada uma é bastante semelhante, com exceção de aditivos para lhes conferir a cor desejada. Segundo McLellan & Shand (1984), a composição dos recipientes de vidro de soda-cal é 73% SiO_2 , 13% Na_2O e 10% CaO .

A organização das moléculas do vidro é uma estrutura tridimensional de tetraedros de SiO_4 , tal como representada na Figura 1.

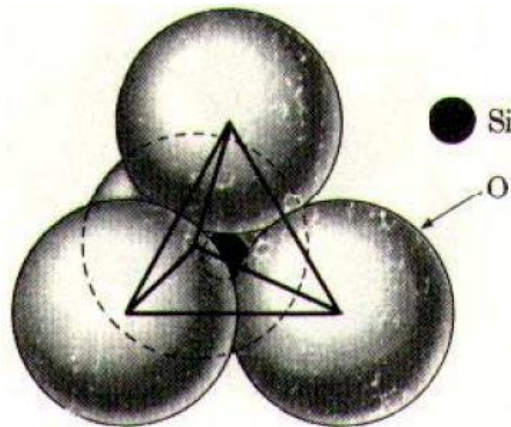


Figura 1 - Estrutura tridimensional de SiO_4

Cada tetraedro está interligado a outros semelhantes através dos vértices, compartilhando entre si um dos 4 átomos de oxigênio de cada tetraedro. Assim formam uma rede tridimensional de tetraedros, tal como está representado na Figura 2 (considerando que há uma quarta ligação acima ou abaixo do plano da imagem).

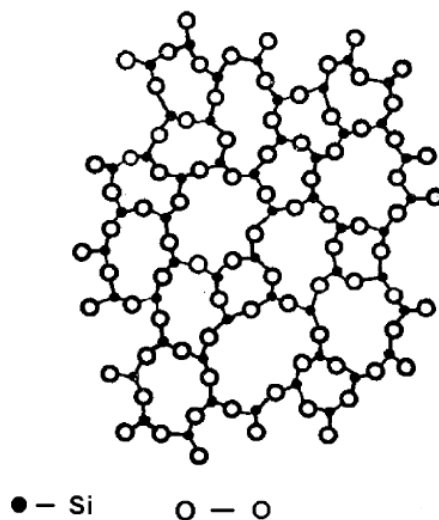


Figura 2 - Estrutura bidimensional de SiO_4

2.2.1. Pozolanicidade

Uma pozolana é um material inorgânico, silicoso ou alumino-silicoso, que apresenta características aglomerantes quando finamente moído e na presença de água e hidróxido de cálcio (Cordeiro, G. C et al. 2009). O seu nome remonta à localidade italiana de Pozzuoli, nas imediações do vulcão Vesúvio onde há 2000 anos os Romanos já usavam as cinzas vulcânicas encontradas nessa localidade como um cimento natural para fazerem as suas construções. Hoje em dia são usadas pozolanas como substitutos parciais do cimento Portland, com vista a reduzir custos e o impacto ambiental resultantes do uso e produção deste. O uso destas pozolanas como substituição do cimento Portland é possível pois a sílica amorfa presente nas pozolanas, quando em contacto com a água solubiliza em meio alcalino e reage com iões Ca^{2+} e forma silicatos de cálcio hidratados C-S-H (C-CaO ; S-SiO_2 ; $\text{H-H}_2\text{O}$). Este C-S-H é similar ao que é produzido nas reações de hidratação do cimento Portland.

Um dos materiais que tem sido cada vez mais estudado como uma substituição viável do cimento Portland devido às suas características pozolânicas é o vidro. Muitos dos estudos realizados acerca da análise das características mecânicas de betões e argamassas em que o cimento foi substituído total ou parcialmente por pó de vidro apontam para que quanto menor forem as partículas de vidro usadas, maior será a pozolanicidade destas (Rachida Idir et al. 2011). Partículas com superfície específica superior a $250 \text{ m}^2/\text{kg}$ têm grande atividade pozolânica, sendo que esta aumenta quanto mais finas forem as partículas (Oliveira et al., 2007).

2.3. O vidro como agregado fino em betões e argamassas

Desde a década de 60 (Pike et al., 1960; Schmidt & Saia, 1963; Phillips et al., 1972; Johnston, 1974) que se tenta usar resíduos de vidro como agregados na produção de betão, mas sem sucesso, pois todas as experiências resultaram na cedência do betão.

Contudo, devido às novas regulamentações, a partir do ano 2000 os custos de desperdiçar resíduos de vidro aumentaram bastante o que levou a que fossem retomadas as investigações acerca do uso desses resíduos na produção de betões e argamassas (Caijun Shi & Keren Zheng, 2007). Chen et al. (2006) concluíram que era possível produzir um betão com 100% de agregados de vidro de várias cores e em diferentes proporções, usando uma mistura com 80% de cimento e 20% de metacaulinos.

Por exemplo, na Austrália, o vidro proveniente do lixo e das centrais de reciclagem já é usado em betões na construção de edifícios. Nos Estados Unidos já é também recomendado o uso desse material na produção de betão (López et al., 2005).

2.3.1. Propriedades no estado fresco

Há já vários estudos realizados com betões e argamassas que contém vidro como agregado fino, no entanto no que diz respeito ao estudo das características destes em estado fresco, sobretudo

de argamassas, os estudos realizados são escassos, pois os investigadores têm focado mais a sua atenção para o estudo das propriedades no estado endurecido.

Em muitos dos estudos realizados, a trabalhabilidade é mantida constante, pois é considerada uma variável que vai alterar os resultados finais e como tal essa variável tem que ser eliminada. Oliveira et al. (2008) usaram um adjuvante redutor de água para manterem a consistência desejada do betão. Foi usada uma dosagem de 0,2% da massa de cimento para a mistura com 25% de areia de vidro e de 0,3% para as misturas com 50% e 100% de areia de vidro. Daqui pode-se concluir que o aumento da percentagem de substituição de vidro resulta uma diminuição da consistência do betão, ou seja, um aumento da trabalhabilidade.

Para betões, o uso de agregados de vidro não traz uma grande diferença na trabalhabilidade deste, mas para que esta possa ser equivalente à de um betão corrente é necessário que se adicione mais água (Pollery et al., 1998). Sem essa adição, há uma diminuição no valor de abaixamento do tronco de cone, na quantidade de ar e na massa volúmica do betão fresco (Topcu & Canbaz, 2004; Chen et al., 2006). Também Park et al. (2004) verificou que tanto os valores de abaixamento do tronco de cone como o fator de compressibilidade dos betões com vidro como agregado fino, diminuem com o aumento da percentagem de vidro que é usado na mistura. Tal pode-se dever ao formato dos grãos de vidro e ao módulo de finura destes.

2.3.2. Propriedades no estado endurecido

Tal como já foi referido anteriormente, é no estado endurecido dos betões e argamassas com vidro como agregado fino que mais estudos já foram realizados, como tal as conclusões que podem ser retiradas desses estudos são já mais aceitáveis pois já foram feitas diferentes abordagens acerca desta temática.

No caso das argamassas, uma substituição de areia fina por resíduos de vidro, numa proporção de 30% a 70%, não tem um efeito nocivo que possa ser detetado a nível macroscópico devido à reação do cimento com o vidro, desde que este não tenha um tamanho superior a 100 μm tendo havido mesmo uma melhoria no desempenho mecânico das argamassas. (Corinaldesi et al., 2005).

Substituindo agregados finos (areia) por vidro moído, a faixa granulométrica que melhores resultados apresenta em termos de resistência à compressão e de tensão de rotura é 0,15 - 0,30 mm, sendo que para melhorar o primeiro parâmetro a percentagem ideal a substituir é 5% e no caso do segundo a percentagem ideal é de 20% (López et al., 2005). Quando se compara o uso de resíduos de vidro finos com o uso de resíduos grossos, o uso dos primeiros traz uma maior vantagem no que diz respeito à resistência à compressão do betão (Terro, 2006).

A resistência à compressão (Figura 3) aumenta com o aumento da proporção de agregado de vidro usado na produção de betão (dimensão máxima de 4,76 mm, massa volúmica de 2525 kg/m³ e módulo de finura de 2,40). A resistência aos 7 dias tem um acréscimo de 26% com a introdução de 25% de agregados de vidro, 26% com a introdução de 50% e de 34% com a

introdução de 100%. Já aos 28 dias o acréscimo é de 24%, 25% e 29% respectivamente (Oliveira et al., 2008). Estes resultados vão contra outros já realizados anteriormente, o que pode ser explicado pela adição de cinzas volantes na produção dos betões aqui estudados.

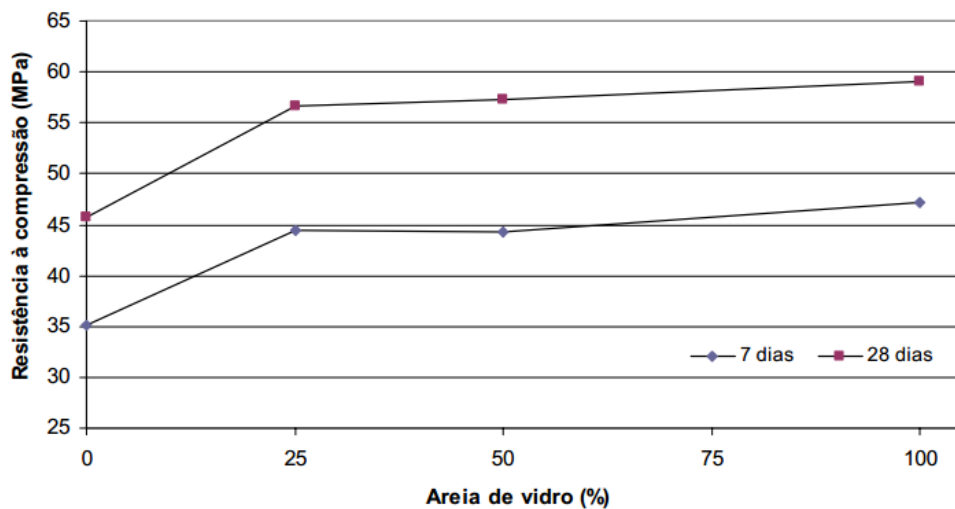


Figura 3 - Resistência à compressão de misturas com areia de vidro, aos 7 e 28 dias de idade (Oliveira et al. 2008)

2.3.3. Durabilidade

Os parâmetros que dependem da porosidade do betão apenas diferem dos betões ditos normais até aos 28 dias, pois estes parâmetros estão relacionados com a estrutura porosa da pasta e a partir dos 28 dias não se encontram grandes diferenças entre os betões com agregados naturais e os betões com agregados de vidro. Assim conclui-se que nas idades de 63 e 90 dias, o coeficiente de capilaridade (Figura 4), a permeabilidade ao ar (Figura 5) e a permeabilidade à água (Figura 6) são mantidos com a substituição de agregados finos naturais por agregados de vidro, sendo que a proporção de substituição que apresenta valores máximos é 50% (Oliveira et al., 2008).

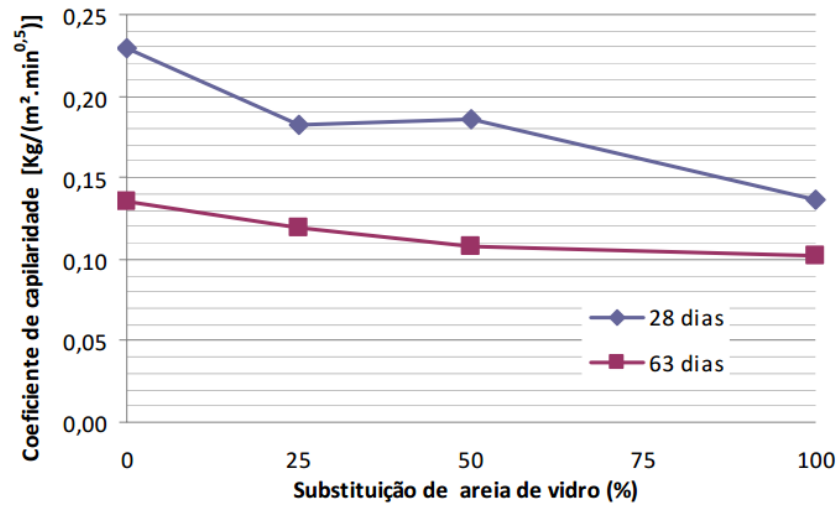


Figura 4 - Coeficiente de capilaridade de diferentes misturas de betão aos 28 e 63 dias (Oliveira et al. 2008)

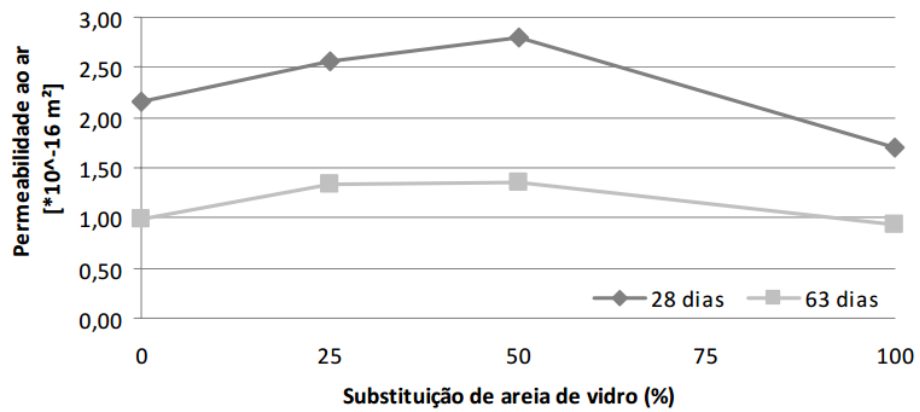


Figura 5 - Coeficiente de permeabilidade ao ar de diferentes misturas de betões aos 28 e 63 dias (Oliveira et al. 2008)

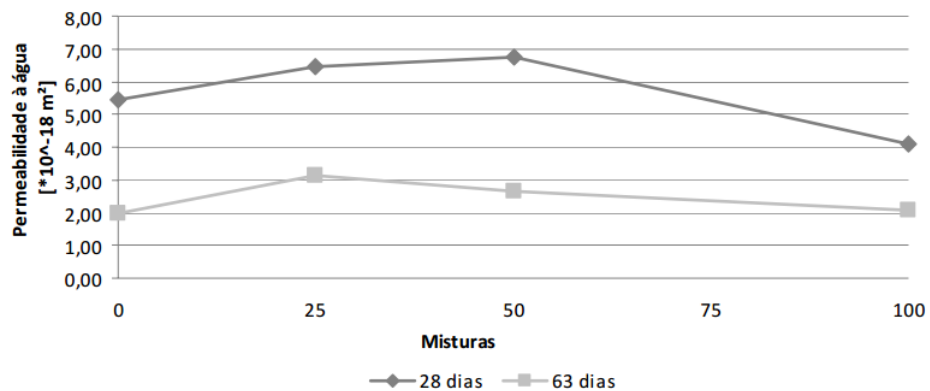


Figura 6 - Coeficiente de permeabilidade à água de diferentes misturas de betões aos 28 e 63 dias (Oliveira et al. 2008)

2.3.3.1. Expansão de betões e argamassas com vidro como agregado fino

Um dos efeitos mais nocivos e que desde cedo foi observado da utilização de resíduos de vidro na produção de argamassas e betões é a expansão destes e a consequente fendilhação e cedência. Este efeito foi observado mesmo com o uso de cimentos com altos teores de alumínio e gesso e com um baixo valor de sílica (Figg, 1981).

Diferentes composições de vidro bem como diferentes cores foram estudadas tendo em vista a redução deste efeito. Quanto à composição, Pike et al. (1960) observou que vidros que contém lítio e chumbo são menos expansivos do que vidros sodo-cálcios correntes. Quanto à influência da cor, Meyer & Baxter (1996) e Bazant et al. (1998, 2000) concluíram que o vidro branco ou incolor é o mais recetivo seguido do vidro de cor castanha e que o vidro de cor verde é o que causa mais expansão do betão. Contudo, em 2004, Zhu & Byars concluíram que a cor do resíduo de vidro não tem qualquer influência na expansividade do betão com agregados de vidro.

Outra das variáveis que influencia a expansibilidade dos betões e argamassas com agregados de vidro é precisamente o tamanho dos agregados de vidro. Também aqui há estudos que apresentam resultados contraditórios. Para Zhu & Byars (2004), os betões tornam-se mais expansivos quanto maior for o resíduo de vidro que é usado na mistura (até 12 mm).

A substituição parcial ou total de agregados finos (areia) por resíduos de vidro na produção de betão não causa uma reação expansiva que possa ser considerada excessiva, não ultrapassando o valor limite imposto pela norma ASTM C 1260 (aos 14 dias) de 0.1% (Oliveira et al., 2008), tal como pode ser observado na Figura 7. Estes resultados foram obtidos com a adição de cinzas volantes à mistura com vista a dar um comportamento mais estável ao betão.

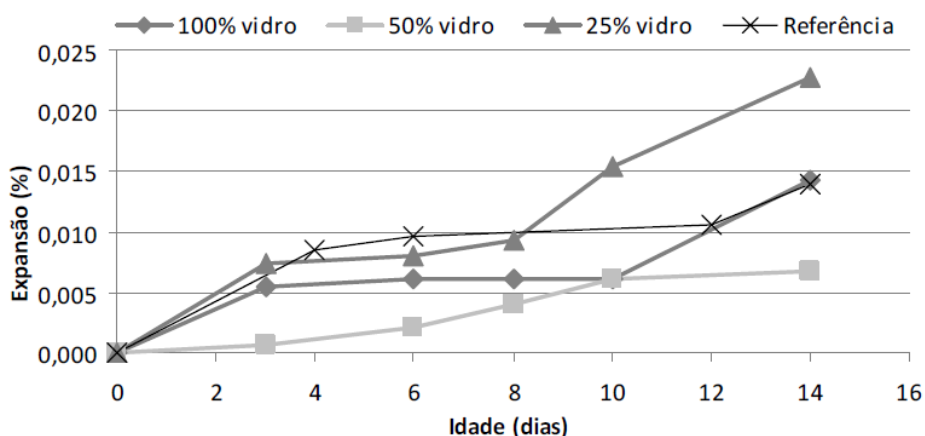


Figura 7 - Expansão de corpos de prova de betão imersos em solução de NaOH (Oliveira et al. 2008)

Para além da adição de cinzas volantes, há outras adições que podem ser usadas tal como escória de alto-forno sílica de fumo e metacaulinos (Meyer & Baxter, 1997; Jin et al., 2000; Zhu & Byars, 2004). Destas adições, os metacaulinos foram os que mostraram ser mais eficazes na redução da expansibilidade dos betões e argamassas com agregados de vidro.

Houve outros estudos que apontam outras soluções para a redução da expansão de betões e argamassas que contém resíduos de vidro. Uma dessas soluções é o aumento da porosidade da mistura ou de um outro agregado mais poroso. A introdução de um agente que promove a porosidade da mistura reduz os valores da expansão do betão em cerca de 50% (Meyer & Baxter, 1998). Já o uso de um agregado mais leve como o xisto revelou uma redução de 60% na expansão do betão (Shi et al., 2005). Uma solução diferente mas que vai no mesmo sentido é o uso de vidro poroso como agregado, o que inibe por completo a expansão do betão (Ducman et al., 2002).

2.3.3.1. Reação alcali-sílica

O motivo que é apontado em diversos estudos como sendo o principal causador da expansão das argamassas e betões produzidos com agregados de vidro é o aparecimento de reações alcali-sílicas entre os constituintes do cimento e os agregados de vidro.

A reação alcali-sílica é uma reação que ocorre entre os alcalis, os constituintes do cimento (hidróxidos) e a sílica que está presente nos agregados (Jun-Ho Shin et al. 2015). A reação ocorre em duas fases: a primeira é a que já foi descrita, e dela resulta um gel hidratado que pode conter também cálcio. Esse gel, quando em contacto com a humidade presente na argamassa ou betão, vai absorver essa água e vai inchar, o que vai levar a que se dê a já referida expansão macroscópica visível na argamassa ou betão. (Ilker Bekir Topc et al., 2007).

Para que esta reação possa acontecer é necessário que estejam presentes três condições essenciais:

- Haver uma quantidade de sílica reativa presente no agregado;
- Haver uma quantidade suficiente de alcalis que normalmente estão presentes na pasta de cimento;
- Haver humidade suficiente, ou seja, um valor de humidade relativa nos poros de cimento nunca inferior a 80%.

Se alguma destas três condições não se verificar, a expansão não ocorre (Jun-Ho Shin et al. 2015).

Apesar de esta reação ser um fenómeno conhecido e bastante estudado em argamassas e betões que contém agregados de vidro, o mecanismo molecular que ocorre e como ocorre ainda é pouco conhecido. Contudo, pode ser descrito da seguinte forma: os iões hidroxilos resultantes da dissolução da sílica reagem com hidróxidos de cálcio e produzem silicato de cálcio hidratado (C-S-H) bastante rico em cálcio (Ca). Isto ocorre até que todo o hidróxido de cálcio seja consumido, o que faz com que o C-S-H se torne rico em sílica e só aí é que se forma o gel referido anteriormente e que depois vai absorver água e se vai expandir (Hou et al. 2013).

Para que esta reação ocorra, o tamanho das partículas é determinante, apesar de a influência de cada tamanho de agregado não ser consensual entre os vários estudos efetuados. O tamanho mínimo que causa expansão vai de 150 µm até 1 mm, dependendo do tipo de vidro, do tipo de betão e das condições experimentais (Rachida Idir et al. 2011). O aumento mais significativo na expansão devida à reação alcali-silica dá-se com partículas com tamanho entre 1.18 mm e 2.36 mm, sendo que a partir deste valor a expansibilidade diminui gradualmente (Ilker Bekir Topc et al. 2007; Hongjian Du & Kiang Tan 2014)

Para dimensões inferiores a 300 µm a expansão é reduzida pois para essa gama de partículas, o vidro pode adotar propriedades pozolânicas, o que pode ser benéfico para a substituição de cimento por pó de vidro (Ilker Bekir Topc et al. 2007).

2.4. Exigências normativas das argamassas

No presente trabalho a referência normativa usada para o controlo da qualidade e produção das argamassas é a norma europeia EN 998-1 que foi editada em 2003 para determinar quais são as especificações a seguir na produção e utilização de argamassas. Existem outras referências normativas, como por exemplo a classificação de argamassas MERUC criada pelo instituto francês “*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*” (CSTB) e que resulta do amplo conhecimento dos franceses acerca da produção e uso de argamassas industrializadas.

Na já referida norma, os requisitos são separados em requisitos dos materiais constituintes, requisitos para argamassas endurecidas e requisitos para argamassas no estado fresco. Para o estado endurecido, os requisitos são separados em dois tipos:

- Gerais, que são iguais para todas as argamassas independentemente do tipo ou uso específico e das condições de exposição requeridas;
- Específicos, que são os requeridos para cada tipo e uso da argamassa e a respetiva exposição

2.4.1. Materiais constituintes

No que diz respeito aos materiais utilizados e mais particularmente aos agregados, sabe-se que para ser considerada uma argamassa e não um betão, a máxima dimensão do agregado não pode exceder os 4 mm. Na norma EN 998-1:2003 é especificado que é o fabricante da argamassa que deve manter registo da adequação do material utilizado.

2.4.2. Argamassas no estado endurecido

2.4.2.1. Gerais

Nesta categoria que, como já foi referido anteriormente diz respeito a qualquer tipo de argamassa e uso da mesma, são especificados os intervalos de valores aceitáveis para a

resistência à compressão aos 28 dias, a absorção de água por capilaridade e a condutibilidade térmica, tal como são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos gerais para argamassas no estado endurecido (EN 998-1:2003)

	Categorias	Valores
Intervalo de resistência à compressão aos 28 dias	CS I	0,4 a 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 a 5,0 N/mm ²
	CS III	3,5 a 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6 N/mm ²
Absorção de água por capilaridade	W 0	não especificado
	W 1	$c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W 2	$c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Condutividade térmica	T 1	≤ 0,1 W/m.K
	T 2	≤ 0,2 W/m.K

2.4.2.2. Específicos

Neste ponto são apresentados os restantes requisitos impostos pela norma, individualizados para cada tipo de argamassa, sendo estes: de uso geral, leves, coloridas, monomassas, de renovação ou de isolamento térmico. Os requisitos mais pertinentes no âmbito do presente trabalho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Síntese dos requisitos específicos para argamassas no estado endurecido (EN 998-1:2003)

Parâmetro	Norma	Uso Geral	Leves	Coloridas	Monomassa	Renovação	Isolamento Térmico
Densidade em seco aparente (kg/m ³)	EN 1015-10	Intervalo de valores declarados	Intervalo de valores declarados ≤ 1300 kg/m ³	Intervalo de valores declarados	Intervalo de valores declarados	Intervalo de valores declarados	Intervalo de valores declarados
Resistência à compressão (categorias)	EN 1015-11	CS I a CS IV	CS I a CS III	CS I a CS IV	CS I a CS IV	CS II	CS I a CS II
Aderência (N/mm ²) e tipo de fratura (A, B ou C)	EN 1015-12	≥ Valor declarado e tipo de rotura	≥ Valor declarado e tipo de rotura	≥ Valor declarado e tipo de rotura	-	≥ Valor declarado e tipo de rotura	≥ Valor declarado e tipo de rotura
Absorção de água por capilaridade	EN 1015-18	W 0 a W 2	W 0 a W 2	W 0 a W 2	W 1 a W 2	≤ 0,3 kg/m ² depois de 24h	W 1

2.4.3. Argamassas no estado fresco

Para argamassas no estado fresco, a norma EN 998-1:2003 apenas especifica dois requisitos que estas devem seguir, sendo estes, o **tempo de utilização** e a **quantidade de ar**.

No caso do primeiro, a norma diz que o tempo de utilização deve ser declarado pelo fabricante. Este valor não deve ser ultrapassado quando for retirada uma amostra da argamassa fresca segundo a norma EN 1015-2 e testada segundo a norma EN 1015-9.

Para a quantidade de ar a norma não obriga o fabricante a declarar um valor para este parâmetro. No entanto, se a utilização prevista o justificar, se for retirada uma amostra segundo a norma EN 1015-2 e testada segundo a norma EN 1015-9, o valor obtido não deve ultrapassar o declarado pelo fabricante.

3. Reologia de argamassas

3.1. Introdução

O estudo das argamassas em estado fresco tem uma grande importância pois é neste estado que estas são aplicadas e manuseadas. Contudo, esta é uma área de estudo das argamassas que ainda está pouco desenvolvida e que até aos últimos anos tem carecido de fundamentação científica. Até aos dias de hoje a determinação da consistência e trabalhabilidade das argamassas tem sido bastante baseada em conhecimentos empíricos.

As argamassas são uma mistura de proporções adequadas de cimento, agregados e água. Pode ser assumido que os agregados são partículas que se encontram em suspensão num líquido viscoso que é a pasta de cimento (Sousa J. G., Bauer E., 2002). As características dessas partículas tais como a sua concentração, distribuição granulométrica, propriedades da sua superfície têm grande influência na reologia das argamassas. São essas características que vão determinar a forma como estas interagem entre si no meio do já referido líquido viscoso que é a pasta de cimento (Banfill P.F.G., 2003).

Enquanto as argamassas se encontram em estado fresco, há vários fatores e processos que podem influenciar a sua reologia. A atenção prestada às características das argamassas enquanto frescas - trabalhabilidade por exemplo - é bastante pequena, contudo estas têm uma grande influência no desempenho destas seja no estado fresco ou já no estado endurecido. Processos como o transporte, o bombeamento, o espalhamento, a injeção, o nivelamento, a moldagem e a compactação estão diretamente relacionados com a reologia da argamassa. Alguns fatores que estão relacionados com a reologia e que têm uma forte influência nestes processos são:

- Fluxo e resistência friccional contra superfícies;
- Aderência;
- Resistência à segregação;
- Resistência à formação de água escorrente;
- Baixo conteúdo de água de forma a obter alta resistência e durabilidade;
- Resistência ao escorregamento sob o próprio peso numa parede ou numa superfície inclinada;
- Baixa pressão sobre as cofragens temporárias para conter uma parede ou outro componente.

A trabalhabilidade das argamassas é muitas vezes definida pelo próprio operador que adequa as dosagens dos diversos constituintes para obter a trabalhabilidade desejada. Contudo, o

comportamento reológico de argamassas com diferentes constituintes e diferentes proporções é diferente, razão pela qual se torna necessário desenvolver uma metodologia de produção de argamassas que seja baseada não em conhecimentos empíricos, mas sim em estudos e conceitos microestruturais/reológicos o que faz com que a trabalhabilidade passe a ser uma grandeza reológica mensurável cientificamente, reduzindo o erro sob o operador (L. S. Girotto et al., 2014).

A técnica de mistura utilizada também tem influência nas propriedades das argamassas no estado fresco e por consequência na sua reologia. Usando uma técnica manual ou mecânica a diferença de magnitude da taxa de corte entre as partículas internas, o volume de argamassa tempo despendido em cada uma das técnicas vão resultar em diferentes propriedades reológicas (R. P. Silva, 2006).

Nesta área de estudo das argamassas não há ainda uma grande quantidade de trabalhos realizados, e a grande maioria é focado no estudo de argamassas convencionais com uma mistura de cimento, água e agregados de areia natural. No presente trabalho pretende-se estudar a influência da substituição de várias percentagens de agregados de areia natural por agregados de vidro reciclado e compreender se essa substituição traz vantagens no que diz respeito às propriedades reológicas das argamassas com este tipo de agregados quando comparadas com as argamassas convencionais.

3.2. Reologia

O termo reologia surgiu da junção dos vocábulos gregos *reos* que significa fluir e *logos* que significa ciência ou estudo. Daqui pode-se logo concluir que a reologia estuda o fluxo dos materiais (Barnes H. A. et al., 2000). A reologia estuda os materiais ditos complexos que não podem ser classificados somente como gás, líquido ou sólido e tem como finalidade determinar a força necessária para causar uma dada deformação ou um determinado escoamento num corpo (L. S. Girotto et al., 2014)

Quando são misturados sólidos com um líquido, como acontece no caso das argamassas, pode haver formação de aglomerados. Os aglomerados são partículas pequenas que estão fortemente ligadas devido às forças de Van der Waals (forças superficiais atrativas e de curta distância). Os aglomerados levam à heterogeneidade da mistura e são as tensões de corte criadas por esta e também pela presença dos agregados que vão quebrar os aglomerados e promover a homogeneização da mistura. Este processo de quebra de aglomerados pode ser avaliado usando a reometria, mais concretamente, a reometria rotacional com recurso a reómetros do tipo planetário. Outro tipo de reómetros existentes são os reómetros tubulares.

O estudo do comportamento reológico de argamassas em estado fresco baseia-se em dois modelos principais, que podem ser subdivididos em outros. Esses principais modelos são:

- Newtoniano, que apresenta uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de corte e em que a viscosidade é constante a uma dada temperatura e pressão;
- Não Newtoniano, em que a viscosidade não é constante e depende da taxa de corte aplicada a uma dada temperatura e pressão. Este modelo pode ser dividido em vários que serão desenvolvidos mais à frente neste trabalho.

Vários estudos apontam para que as misturas à base de cimento apresentam um comportamento próximo ao de um fluido de Bingham, que é um fluido que segue o modelo não Newtoniano (Stolz, 2011). O modelo que representa o comportamento destes fluidos é o descrito na equação (1):

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (1)$$

Em que τ é a tensão de corte (depende do tempo e das solicitações resultantes do processo de mistura da argamassa), τ_0 é a tensão de cedência (consequência das forças interpartículas), μ é o coeficiente de viscosidade plástica e γ é a taxa de corte. Neste modelo quando a tensão de corte é menor que a tensão de cedência ($\tau < \tau_0$) o material é considerado um sólido elástico e para tensões de corte superiores apresenta um comportamento viscoso (Banfill P.F.G., 2003).

3.3. Parâmetros reológicos

Os parâmetros reológicos fundamentais para se avaliar o comportamento reológico das argamassas, e os quais foram estudados no presente trabalho, são a tensão de cedência e a viscosidade plástica relativas. Os valores destes parâmetros estão dependentes das tensões de corte aplicadas e da sua magnitude (R. Silva, 2006). Os parâmetros reológicos são também influenciados pela natureza, tipo e forma dos agregados e também pela dosagem de água. A quantidade de finos presentes na mistura resultantes da britagem dos agregados aumentam o atrito interpartículas e por consequência têm uma grande influência na tensão de cedência da argamassa contribuindo para a viscosidade plástica (Oliveira et al., 2014).

A tensão de cedência é a tensão mínima que tem que ser aplicada no fluido de modo a que a cedência dos materiais em suspensão comece, estando dependente do tipo e da quantidade de contactos entre os grãos devido ao atrito entre eles (De Larrard, 1999).

A viscosidade é definida por Betioli (2007) como a relação diretamente proporcional entre a taxa de corte e a tensão de corte, considerando duas placas paralelas de área A , em que uma delas se move e a outra permanece parada e entre elas há um fluido de modo a manter a placa que se move com velocidade constante. A viscosidade é uma medida de resistência ao fluxo. Um fluido em que a sua viscosidade depende do tempo é definido como tixotrópico. A sua viscosidade pode diminuir ao longo do tempo sob determinada velocidade de corte. Com a agitação do fluido, os flocos que o constituem podem ser separados nos seus constituintes mais básicos. Após o término da agitação, as partículas voltam a juntar-se e a formar flocos, o que

vai aumentar novamente a resistência ao fluxo. Dá-se uma destruição e posteriormente uma gradual reconstrução.

No caso das argamassas a estrutura que é destruída com a agitação não é recuperada na totalidade, havendo uma parte da estrutura que é destruída irreversivelmente. Este processo pode ser explicado pelo modelo da atração de Van der Waals e pelos efeitos de repulsão da dupla camada elétrica. Este modelo é explicado para partículas de cimento na Figura 8. Quando as partículas de cimento seco entram em contacto com a água formam uma membrana de produtos hidratados à volta das partículas de cimento (Figura 8(a)). Num segundo momento, é aplicada a tensão de corte, o que leva a que a membrana se rompa desagregando as partículas (Figura 8(b)). Depois de separadas, as partículas já não conseguem estabelecer ligações, havendo apenas uma aproximação entre elas para uma distância que corresponde ao mínimo de energia repulsiva (Figura 8(c) e 8(d)) (Banfill P.F.G., 2003).

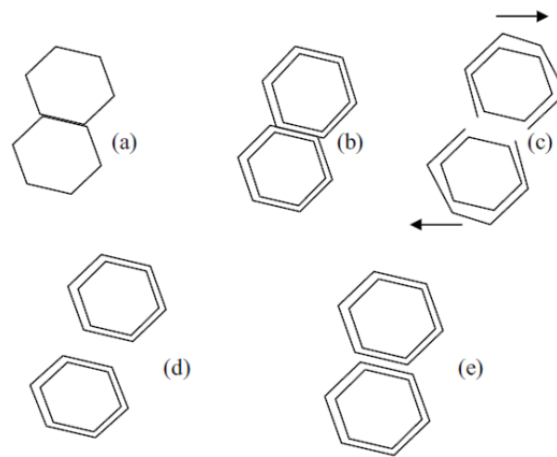


Figura 8 - Modelo da atração de Van der Waals para a destruição estrutural irreversível por ações de corte para partículas de cimento (Banfill P.F.G., 2003)

3.4. Modelos de caracterização reológica

Os modelos reológicos são curvas que se ajustam da melhor maneira aos dados gerados pelos viscosímetros - ou reómetros para fluídos em que a viscosidade varia com as condições de fluxo, como é o caso das argamassas - para descrever da melhor forma os diferentes tipos de curvas de fluxo. Estes modelos são expressões matemáticas em que os seus parâmetros são ajustáveis de forma a que representem da melhor forma o comportamento experimental observado. Na Tabela 3 apresentam-se os modelos reológicos mais usados uma breve descrição do seu uso e das suas particularidades.

Tabela 3 - Principais modelos reológicos

Modelo	Uso	Expressão	Particularidade
Newtoniano	Quando há uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de corte; Interseção de 0,00 Pa no eixo da tensão de corte	$\tau = \mu\gamma$	A viscosidade μ é o coeficiente de proporcionalidade
Ostwald-de-Waele	Quando a viscosidade não é constante; Interseção de 0,00 Pa no eixo da tensão de corte;	$\tau = K\gamma^n$	Parâmetros K e n ajudam na descrição de materiais pseudoplásticos ($n < 1$) e dilatantes ($n > 1$); Líquidos Newtonianos - $n = 1$
Bingham	Para pastas, suspensões e lamas onde geralmente há uma tensão de cedência observada na interseção da curva com o eixo da tensão de corte	$\tau = \tau_0 + \mu\gamma$	Apesar de definir uma tensão de cedência, não chega para afirmar que a partir do valor desta a relação entre a taxa de corte e a tensão de corte é linear, e geralmente não o é, sendo o valor da tensão de cedência sobrestimada
Herschel-Bulkley	Combinação entre pseudoplásticos e tensão de cedência (lamas químicas e de fabrico)	$\tau = \tau_0 + K\gamma^n$	Ao juntar o modelo de Ostwald-de-Waele com o de Bingham, a relação entre a taxa de corte e a tensão de corte é melhor estimada a partir do valor da tensão de corte

Para todos os modelos reológicos acima descritos:

τ - Tensão de corte;

τ_0 - Tensão de cedência;

μ - Coeficiente de viscosidade plástica;

γ - Taxa de corte;

K e n - Constantes dependentes do material.

3.5. Estudos realizados no âmbito da reologia de argamassas

Como já foi referido nos pontos 3.1. e 3.2. os estudos da reologia de argamassas apesar de serem bastante importantes, ainda são escassos. Contudo, cada vez mais têm sido realizados estudos no sentido de se compreender a influência de vários fatores nas propriedades reológicas das argamassas no estado fresco e também as consequências e os resultados destas no estado

endurecido das argamassas. A maior parte dos estudos são direcionados para a determinação da influência das características dos agregados na reologia de argamassas. Em seguida apresentam-se algumas das conclusões obtidas em alguns estudos realizados acerca da reologia de argamassas.

Um dos fatores que mais influência tem nas propriedades reológicas das argamassas são as características dos agregados. Estes têm influência em vários parâmetros como a trabalhabilidade, a mobilidade, a capacidade de escoamento e a segregação. Harini et al. (2012), estudaram a influência da distribuição granulométrica, do tamanho e do tipo de agregados no escoamento de argamassas e para tal usou dois tipos de agregados: uma areia de origem fluvial e um pó moído. Realizou 103 séries de argamassas variando as razões agregados/cimento e água/cimento. Neste estudo foi concluído que quanto maior for a quantidade de vazios não compactados presentes na argamassa, menor é a fluidez desta. Este parâmetro também diminui com o aumento do teor de agregados e com a diminuição da razão água/cimento para cada tamanho de agregado.

Em 2008, Westerholm et al. usaram um viscosímetro rotacional para avaliar a influência das propriedades dos agregados em vários parâmetros reológicos de argamassas. Quanto ao tipo de agregados finos usados na produção das argamassas, os resultados obtidos variaram entre os 96 Pa e os 550 Pa para a tensão de cedência e os 1,3 Pa.s e os 8,8 Pa.s para a viscosidade plástica. Os agregados obtidos do esmagamento de rochas apresentam os valores superiores quando comparados com os agregados naturais. Contudo, devido às granulometrias bastante diferentes entre os agregados estudados, é difícil tirar conclusões em relação aos valores obtidos. Para as diferentes formas de agregados, Westerholm et al. (2008) concluíram que os agregados resultantes do esmagamento de rochas resultam numa maior viscosidade plástica do que os agregados mais esféricos. Isto deve-se à maior interferência inter-partículas dos agregados menos esféricos. Já a influência da quantidade de finos nas duas propriedades reológicas já referidas não é tão linear como para as outras características de agregados já referidas. A tensão de cedência aumenta linearmente quando se ultrapassa uma percentagem de finos de 16%, requerendo a partir deste valor uma maior proporção de água na mistura. Já para a viscosidade plástica, a maioria dos agregados resultantes do esmagamento de rochas apresenta um valor mínimo de viscosidade plástica por volta dos 24% de finos, e só a partir dessa percentagem é que este parâmetro reológico começa a aumentar linearmente com o aumento da percentagem de finos.

S.T. Erdogan *et al.* (2008) usaram agregados produzidos em laboratório - cubos e esferas - para estudar a influência da rugosidade destes na tensão de cedência e na viscosidade plástica das argamassas. Concluíram que a rugosidade dos agregados tem pouca influência na tensão de cedência e na viscosidade plástica das argamassas. Contudo, no referido estudo estes resultados podem ser devidos ao facto de que a ordem de grandeza da diferença na rugosidade dos agregados era bastante pequena, o que pode explicar que os resultados obtidos nos testes

reológicos sejam bastante aproximados uns dos outros o que leva a que não se possa concluir com exatidão que a rugosidade não tem influência na reologia de argamassas.

Dos estudos acima referidos pode-se concluir que o tipo, forma e tamanho dos agregados exerce uma grande influência nas características das argamassas no estado fresco e conseqüentemente nos seus parâmetros reológicos. Estas conclusões são de extrema importância para o presente trabalho, pois a variável entre as diferentes argamassas estudadas é o tipo de agregados, nomeadamente a substituição de agregados de areia natural por agregados de vidro reciclado que apresentam grandes diferenças entre si, seja na forma ou na rugosidade.

4. Procedimento experimental

4.1. Introdução

Com o intuito de estudar o comportamento de argamassas com vidro reciclado como agregado fino, foi realizado um estudo experimental nos Laboratórios de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior. O objetivo deste trabalho experimental foi o de avaliar qual a influência da substituição dos agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado no desempenho de argamassas. Foram realizados ensaios às argamassas no estado fresco e no estado endurecido para assim se estudarem as suas propriedades mecânicas, físicas e reológicas.

No presente trabalho pretendeu-se avaliar principalmente a influência da substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado no comportamento das argamassas em estado fresco, nomeadamente o estudo da sua trabalhabilidade através da análise dos parâmetros reológicos como o torque quando submetidas a determinadas velocidades num determinado período de tempo.

Também foram realizados ensaios às argamassas no estado endurecido, com o objetivo de avaliar a sua resistência mecânica e a sua durabilidade. Estes ensaios serviram para avaliar a viabilidade da aplicação, na construção, destas argamassas contendo uma percentagem de vidro reciclado na sua composição.

Sempre que possível, tendo em conta os materiais e instrumentos disponíveis no laboratório, os ensaios seguiram as diretrizes da norma vigente para o estudo de argamassas, a Norma EN 1015.

4.2. Materiais utilizados

Os materiais utilizados nos ensaios laboratoriais descritos neste capítulo foram selecionados mediante pesquisa bibliográfica adequada e segundo os requisitos normativos em que são especificados. Também teve que ter sido em conta os materiais existentes nos Laboratórios de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior.

4.2.1. Cimento

Na produção de uma argamassa o cimento é o ligante. O tipo de cimento usado no presente trabalho foi o cimento Portland CEM I 32,5R, classificado de acordo com a norma portuguesa NP EN 197-1:2001. A análise química do cimento, bem como os ensaios mecânicos e físicos que caracterizam este material foram realizados e cedidos pela empresa que o fornece.

4.2.2. Agregados finos

4.2.2.1. Areia natural

A areia natural usada foi uma areia amarela de origem fluvial, proveniente do rio Tejo (areia grossa) com um calibre 0/4. Esta opção foi tomada pois era a areia que tinha uma granulometria mais próxima da pretendida, ou seja, a do resíduo de vidro usado tal como é explicado no ponto 4.3. deste trabalho.

4.2.2.2. Areia de vidro

O vidro usado neste trabalho foi proveniente da reciclagem de garrafas vazias recolhidas em vários estabelecimentos comerciais da região da Covilhã, não havendo critério na escolha das cores das garrafas usadas, pelo que não é possível determinar qual a percentagem de cada cor de vidro que foi usada neste trabalho.

A todas as garrafas foram retirados os rótulos e todos os outros elementos que não eram de vidro, para que não houvesse interferência de outros materiais que pudessem contaminar e adulterar os resultados obtidos no programa experimental. Após este processo, as garrafas foram esmagadas num britador de mandíbulas, cuja abertura foi mantida constante durante todo o trabalho de forma a obter um resíduo com granulometria constante, que será descrita mais à frente neste trabalho.

4.2.3. Água de amassadura

No presente trabalho não houve uma especial preocupação com as características de amassadura. Ainda assim, foi sempre usada água potável da rede pública de abastecimento, de acordo com a norma NP EN 1008:2003.

4.3. Ensaio de caracterização dos materiais

4.3.1. Análise granulométrica

Para o ensaio de análise granulométrica dos agregados, foram cumpridas as especificações da Norma Portuguesa NP EN 933-1:2000. Na realização da análise granulométrica dos agregados, foi utilizada uma peneiradora mecânica e os respetivos peneiros de malha quadrangular, como se pode ver nas Figuras 9 e 10. Foram usados os peneiros com as seguintes malhas: 8 mm; 4 mm; 2 mm; 1 mm; 0,500 mm; 0,125 mm; 0,250 e 0,063 mm. Foi também usada uma balança de precisão KERN PCP com uma capacidade máxima de pesagem de 10 kg e precisão não inferior a 0,1 gramas (Figura 11). Os materiais foram secos numa estufa ventilada a 100 °C durante 120 minutos.



Figura 9 - Peneiros sobre a peneiradora mecânica



Figura 10 - Pormenor de um peneiro de malha quadrada



Figura 11 - Balança de precisão KERN PCP

Depois de secos, os agregados foram passados pelos vários peneiros, por ordem decrescente de abertura de malha com auxílio de movimentos mecânicos realizados pela peneiradora, (Figura 9). Por fim foi determinada a massa do agregado que ficou retido em cada peneiro de forma a traçar a curva granulométrica.

Neste trabalho, um ponto ao qual era necessário ter especial atenção, era que a granulometria dos agregados de areia natural e os agregados de areia de vidro reciclado fosse semelhante. Como tal, numa primeira fase foi realizada a análise granulométrica do agregado de vidro obtido por britagem como descrita no ponto 4.2.2.2. A curva granulométrica e as percentagens de material que ficaram retidos e que passaram em cada peneiro são apresentadas na Figura 12 e na Tabela 4, respetivamente. Após se saber a percentagem de resíduo de areia de vidro reciclado que ficou retido em cada peneiro, foi produzida uma granulometria semelhante com a areia natural.

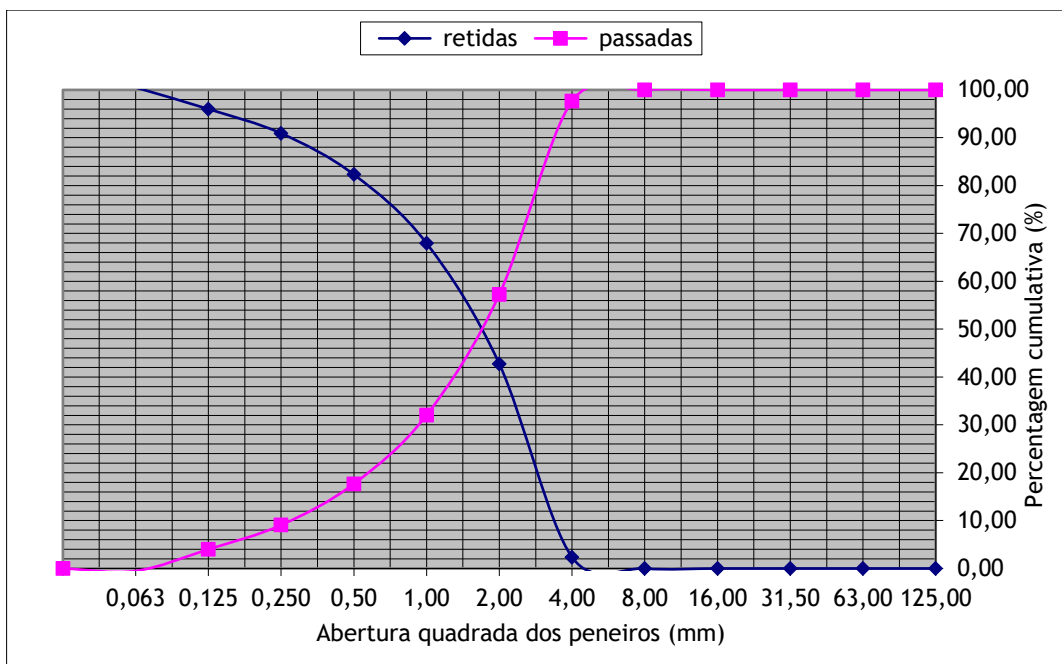


Figura 12 - Curva granulométrica do agregado de areia de vidro reciclado

Tabela 4 - Percentagens e quantidades de material retido e passado nos peneiros, para a areia de vidro reciclado

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Material retido		Percentagens acumuladas	
			Passados	Retidos
	(g)	%	(%)	(%)
8,00	0,00	0,00	100,00	0,00
4,00	13,90	2,36	97,64	2,36
2,00	237,90	40,37	57,27	42,73
1,00	148,60	25,22	32,05	67,95
0,50	84,70	14,37	17,68	82,32
0,250	50,70	8,60	9,08	90,92
0,125	29,90	5,07	4,00	96,00
0,063	26,60	4,51	-0,51	100,51
Material restante no fundo	0	-0,51	0,00	100,00
Total	592,30	100,00		

4.4. Composição das argamassas estudadas

Para se definir a composição das argamassas a serem estudadas neste trabalho, foram definidas as proporções em massa dos vários constituintes das argamassas. Para tal, foi estudada uma argamassa de referência com 100% de areia natural. Foi definido um traço em massa de cimento:areia de 1:3. A definição da água necessária foi realizada através do ensaio de consistência *flow table* segundo a Norma EN 1015-3:1999, definindo-se um valor para o

diâmetro obtido no referido ensaio de 190 ± 10 mm. Para se obter este valor foi alterada a percentagem de água de amassadura, em massa, até que a argamassa de referência tivesse a consistência desejada. A percentagem de água que resultou no valor de diâmetro no ensaio *flow table* que corresponde à consistência pretendida na argamassa de referência foi de 17% de água, em massa.

Após a obtenção da quantidade de água para a argamassa de referência, este valor foi mantido constante para se poder avaliar a alteração da consistência das argamassas sob a influência da substituição de agregados de areia natural por agregados de vidro reciclado. Posto isto, as únicas proporções que foram alteradas foram as percentagens de agregado natural e de agregado de vidro reciclado, mas mantendo a soma das suas massas constantes e iguais ao valor da massa usada na argamassa de referência.

4.5. Procedimento de mistura

Todos os passos do procedimento de mistura das argamassas testadas que serão descritos neste ponto foram realizado segundo a Norma EN 1015-2:1999.

Tendo em conta os valores definidos no ponto 6.1 da referida norma para a quantidade de argamassa a ser produzida e também o valor de massa máximo que a misturadora disponível nos Laboratórios de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior pode suportar, foi definido um valor de massa para os constituintes sólidos de 2400 g e tendo em conta o valor de 17% descrito em 4.4. deste trabalho, o valor em massa da água de amassadura usada foi de 408 g.

Os passos seguidos na mistura das argamassas foram os seguintes:

- I. Pesagem de cada constituinte da mistura na balança de precisão descrita anteriormente no ponto 4.3.1.;
- II. Depois de pesados, os constituintes sólidos foram colocados num tabuleiro de aço inoxidável e misturados entre si (Figura 13);



Figura 13 - Constituintes sólidos misturados num tabuleiro de aço inoxidável (cimento ; areia natural e areia de vidro)

- III. No recipiente de aço inoxidável da misturadora de argamassas utilizada foi colocada a quantidade de água pesada anteriormente (408 g);
- IV. Ligou-se a misturadora apenas com a água, e de seguida foram introduzidos os constituintes sólidos durante um período de 15 segundos deixando-se depois a misturadora ligada durante mais 75 segundos e por fim esta é desligada;



Figura 14 - Misturadora de argamassas

- V. Por último retirou-se o recipiente de aço inoxidável onde foi feita a mistura e a argamassa está pronta para os ensaios pretendidos (Figura 15).



Figura 15 - Argamassa misturada no recipiente de aço inoxidável

4.6. Ensaio no estado fresco

Neste ponto serão descritos quais os ensaios realizados nas argamassas no estado fresco e qual o procedimento experimental seguido em cada um. Os ensaios realizados foram:

- Consistência por espalhamento ou *flow table* (4.6.1.);
- Ensaio de massa volúmica aparente (4.6.2.);
- Ensaio reológico (4.6.3.).

4.6.1. Consistência por espalhamento ou *flow table*

Tal como já foi referido no ponto 4.4., este ensaio segue a Norma EN 1015-3:1999. O ensaio foi realizado logo após a amassadura da argamassa. Esta é colocada num molde cónico de aço inoxidável que se encontra centrado no disco, também ele de aço inoxidável (Figura 16). O

cone é cheio até a metade e de seguida com a ajuda de um pilão, compacta-se a argamassa com 10 pancadas uniformes. De seguida preenche-se o resto do cone e compacta-se novamente a argamassa com 10 pancadas uniformes com o pilão. Depois de compactada, com a ajuda de uma espátula rasa-se o topo do cone pelo nível superior deste de forma a eliminar a argamassa em excesso. O próximo passo é levantar o cone na vertical e de forma lenta e cuidadosa. De seguida, com a ajuda do mecanismo de rotação manual que faz a mesa subir e descer e que resulta em impactos secos sob a amostra, dão-se 15 voltas ao referido manípulo com uma frequência de aproximadamente 1 segundo, o que resulta em 15 pancadas espaçadas de 1 segundo entre cada uma. Por fim, mede-se o diâmetro final da amostra sobre a mesa de espalhamento em duas direções perpendiculares entre si (Figura 17).



Figura 16 - Molde cónico sobre o disco de aço inoxidável da mesa *flow table*



Figura 17 - Argamassa espalhada e pronta a ser medida numa direção com auxílio de 2 objetos paralelos

4.6.2. Ensaio de massa volúmica aparente

O procedimento deste ensaio foi realizado segundo a Norma EN 1015-6:1999. Num primeiro passo pesa-se um cilindro (Figura 18) com capacidade de 1 dm³ tarando-se a balança. O próximo passo é preencher o cilindro até meia altura e aí a argamassa é compactada com 10 pancadas resultantes da oscilação do recipiente em lados alternados sobre uma superfície rígida na qual é largado de uma muito pequena altura (30 mm aproximadamente). Em seguida enche-se o resto do cilindro e repete-se o processo de compactação. Com o auxílio de uma espátula rasa-se o topo do cilindro de forma a retirar a argamassa em excesso para que se tenha exatamente um volume de 1 dm³. Por fim pesa-se o recipiente com a argamassa no interior com a balança previamente tarada para o peso do recipiente. O valor da massa volúmica é obtido pelo quociente da massa de argamassa no recipiente pelo respetivo volume, como se mostra na equação (2) que se apresenta a seguir:

$$\rho = \frac{m_{arg}}{V_{arg}} \quad (2)$$

Em que:

ρ - massa volúmica da argamassa [kg/m^3];

m_{arg} - massa de 1 dm^3 de argamassa [kg];

V_{arg} - volume de argamassa [dm^3].



Figura 18 - Cilindro de 1 dm^3 de capacidade

4.6.3. Ensaio reológico

Os ensaios de reologia foram realizados com recurso ao Reómetro Viskomat NT (Figuras 19 (a) e (b)) que é especificamente direcionado para avaliar os parâmetros reológicos de argamassas. O procedimento do ensaio consiste em colocar argamassa no recipiente do reómetro até uma medida que está marcada no referido recipiente. Coloca-se o recipiente na posição correta no reómetro e em seguida coloca-se e liga-se o respetivo cabo da pá que vai fazer a leitura da tensão de torque aplicada na argamassa. Em seguida, no computador ao qual está ligado o reómetro e que tem o *software* deste instalado, escolhe-se o perfil desejado para a análise reométrica que mais se adequa à argamassa em estudo e aos dados que se pretendem analisar. Esta informação é enviada para o reómetro, que após ordem do utilizador faz descer a pá até ao recipiente onde se encontra a argamassa que posteriormente entra em rotação a uma velocidade que varia com o tempo, tendo em conta o perfil que foi escolhido no *software*. Esta rotação vai ter como consequência uma resistência por parte da argamassa e é o torque que é originado que vai ser medido e registado pelo reómetro e guardado e exibido no computador.

O perfil usado neste trabalho foi um perfil denominado de “STEP”. Neste perfil a velocidade aumenta de 20 em 20 rpm em intervalos de 60 segundos até um máximo de 120 rpm, valor a partir do qual começa a reduzir a sua velocidade igualmente em intervalos de 20 em 20 rpm em intervalos de 60 segundos até parar, tal como pode ser observado na Figura 20 que é um exemplo do perfil de “STEP” utilizado numa das argamassas estudadas no presente trabalho. Este perfil permite obter os valores de viscosidade plástica e também da tensão de cedência relativas.



Figura 19 - Reómetro Viskomat NT (a) e computador onde está instalado o *software* (b)

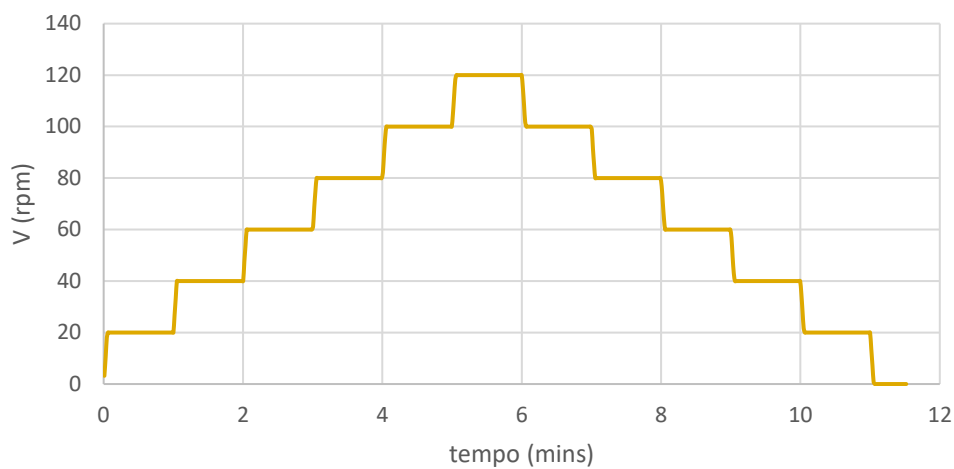


Figura 20 - Perfil de “STEP”

4.7. Ensaio no estado endurecido

Para que as argamassas possam ser ensaiadas no estado endurecido, é necessário que se produzam provetes de forma adequada. Como tal, neste ponto será descrito como os provetes foram produzidos e acondicionados bem como os ensaios que foram realizados sobre estes e a sua descrição.

Para as argamassas no estado endurecido, os ensaios que foram realizados foram:

- Ensaio de ultrassons (4.7.2.);
- Resistência mecânica à flexão (4.7.3.);
- Resistência mecânica à compressão (4.7.4.);
- Absorção de água por capilaridade (4.7.5.);
- Massa volúmica (4.7.6.);
- Absorção de água (4.7.7.).

4.7.1. Preparação e condicionamento dos provetes

Para a determinação das propriedades das argamassas no estado endurecido foram moldados provetes com dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ que se encontram agrupados, em um molde metálico, 3 a 3 (Figura 21). Em primeiro lugar, os moldes são limpos e lubrificados com um óleo mineral antes de receberem a argamassa. Cada molde é preenchido de argamassa até metade da sua altura com uma espátula e depois é compactado com 25 pancadas com um pilão, distribuídas uniformemente ao longo de todo o comprimento de cada molde. Em seguida é preenchida a outra metade dos moldes e compacta-se novamente com 25 pancadas uniformemente distribuídas. Por fim com o auxílio da espátula rasa-se a superfície para que não ultrapasse o limite dos moldes (Figura 22). Após estarem preenchidos, os moldes são colocados numa câmara de cura a uma temperatura de $18^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ e a uma humidade relativa de $90\% \pm 5\%$



Figura 21 - Moldes de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ usados para a produção dos provetes

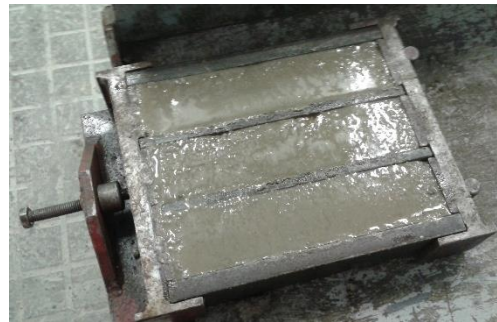


Figura 22 - Moldes preenchidos até ao topo com argamassa

Passadas 24h após a moldagem dos provetes e a sua colocação na câmara de cura (Figura 23) estes são desmoldados e novamente colocados na câmara de cura nas mesmas condições que já foram referidas anteriormente até completarem 28 dias de cura. Nessa altura são retirados da câmara e estão prontos para serem ensaiados.



Figura 23 - Câmara de cura

Para a realização dos ensaios no estado endurecido necessários para este trabalho, foram produzidos 6 provetes de cada tipo de argamassa o que faz um total de 24 provetes. Para cada tipo de argamassa foram usados 3 provetes para os ensaios de flexão, compressão e ultrassons e 3 provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade.

4.7.2. Ensaio de ultrassons

Para a realização deste ensaio, é necessário utilizar um equipamento de ultrassons Pundit (Figura 24). O ensaio de ultrassons consiste em determinar a velocidade de propagação de um impulso ultrassónico entre dois pontos, sendo que no caso deste trabalho esses dois pontos são as duas faces extremas dos provetes. Com este ensaio podem-se obter informações que permitem avaliar a homogeneidade da argamassa, a presença de fendas e defeitos e também as suas características mecânicas.

O tempo que um impulso demora a atravessar o provete é medido em μseg e através desse valor e sabendo as medidas exatas dos provetes é possível calcular a velocidade de propagação da onda na argamassa. Tal como já foi referido no ponto 4.7.1., os provetes usados na realização deste ensaio, foram os mesmos 3 que foram usados para os ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão.

O aparelho de emissão de ultrassons tem que ser calibrado antes da realização do ensaio. Para tal, é colocado entre o emissor e o recetor de ultrassons um “padrão” metálico de forma cilíndrica do qual se sabe que o tempo de propagação de um impulso é de 25,6 μseg . Então, são ajustados os parâmetros do aparelho até que este valor seja registado. Depois de estar calibrado, o ensaio pode ser iniciado. O emissor e o recetor são colocados nas faces mais afastadas do provete, tal como se pode ver na Figura 25, com a exceção de que não devem estar apoiados na mesa, mas sim ser segurados no ar pelo operador. Deve-se aguardar que os valores lidos no ecrã da máquina estabilizem e é então registado o valor de tempo que o impulso demora a atravessar o provete.



Figura 24 - Máquina de ultrassons



Figura 25 - Colocação do emissor e do recetor nas extremidades do provete

Com os resultados do tempo obtidos no ensaio de ultrassons, sabendo as dimensões exatas do provete e a sua massa volúmica é possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico segundo a Norma BS-1881 Part 203/1986 pela equação (3):

$$E_d = \rho V^2 * \frac{(1 + \nu) * (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (3)$$

Em que:

E_d - módulo de elasticidade dinâmico [MPa];

ρ - massa volúmica [kg/m³];

V - velocidade de propagação da onda ultrassónica [km/s];

ν - coeficiente de Poisson (para este estudo adotou-se 0,2).

4.7.3. Resistência à flexão

Este ensaio foi realizado segundo a Norma EN 1015-11:99. Foi usada uma prensa de compressão eletrónica com controlo semiautomático da taxa de compressão e com uma capacidade máxima de 3000 kN (Figura 26). Neste ensaio foram ensaiados 3 provetes de cada tipo de argamassa.



Figura 26 - Prensa de compressão eletrónica

O ensaio consiste em apoiar o provete sobre dois apoios cilíndricos a 30 mm das extremidades e posteriormente aplicar uma carga sem choque, de 0.05 kN/s, a meio (Figura 27) até que se dê a rotura do provete (Figura 28). O valor registado no *software* da prensa corresponde à força máxima exercida na rotura do provete.

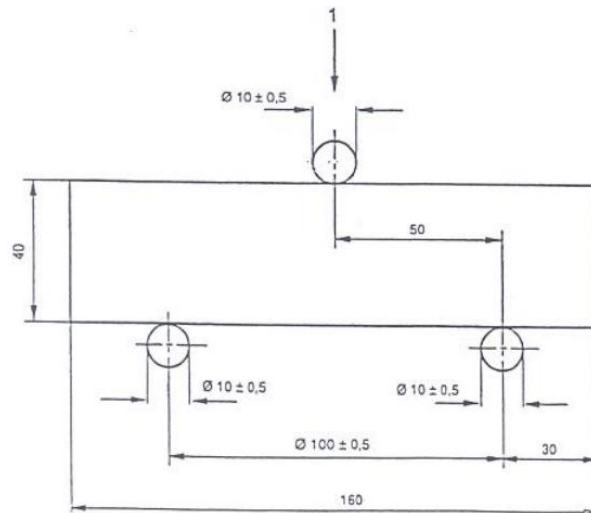


Figura 27 - Representação esquemática do ensaio de resistência mecânica à flexão (EN 1015-11:1999)



Figura 28 - Provetes após a rotura provocada pelo ensaio de resistência mecânica à flexão

4.7.4. Resistência à compressão

Para a realização deste ensaio foi seguida a mesma norma do ponto anterior e também a mesma prensa. Neste ensaio foram usadas as 6 metades resultantes dos ensaios de flexão.

No ensaio de resistência à compressão os provetes são colocados sobre uma base de aço e sob uma placa também ela de aço que aplica uma carga sem choque, de 0.05 kN/s, até que se dê a rotura dos provetes (Figura 29). O valor máximo registado corresponde à força máxima exercida pela prensa até se dar a rotura.

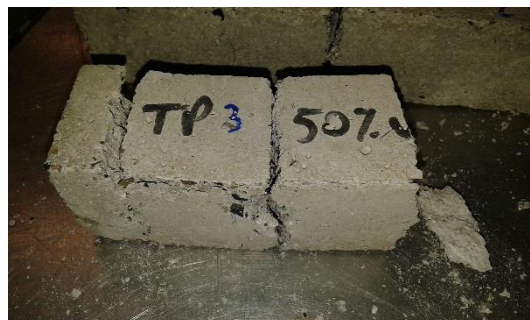


Figura 29 - Provede após a rotura provocada pelo ensaio de resistência mecânica à compressão

4.7.5. Absorção de água por capilaridade

A Norma que foi seguida para a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade foi a EN 1015-18:2002. Para este ensaio, com recurso a uma serra mecânica, os 3 provetes de 40 x 40 x 160 mm³ foram divididos ao meio, resultando 6 provetes com as dimensões 40 x 40 x 80 mm³. Depois de cortados, são colocados numa estufa ventilada a uma temperatura de 60 °C ± 5 °C durante um período de 24 h. Depois de secos na estufa, os provetes são pesados numa balança de precisão e posteriormente apoiados com a face que foi cortada sobre uma calha metálica num tabuleiro que é depois preenchido com água até esta submergir a base dos provetes em 5 a 10 mm (Figura 30). Depois de estarem todos os provetes colocados em posição correta, em intervalos de tempo pré-definidos, os provetes são retirados do tabuleiro, a sua água superficial é retirada com auxílio de um pano ou de papel absorvente e em seguida são pesados. Após este processo os provetes são colocados novamente no tabuleiro.



Figura 30 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade traduzem-se num gráfico que se denomina curva de absorção capilar. Este gráfico exprime a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do provete em função da raiz quadrada do tempo decorrido. Os tempos mais importantes para o cálculo do coeficiente de capilaridade são os 10 e os 90 minutos.

A equação (4) é usada para o cálculo do coeficiente de capilaridade:

$$C = 0,1 * (M_2 - M_1) \quad (4)$$

Em que:

C - coeficiente de capilaridade $\left[\frac{kg}{m^2 * min^{0,5}} \right]$;

M₁ - massa do provete após 10 minutos de imersão;

M₂ - massa do provete após 90 minutos de imersão;

4.7.6. Massa volúmica

Este ensaio segue a Norma EN 1015-10:1999. Após os provetes serem secos numa estufa ventilada a uma temperatura de 60 °C ± 5 °C durante um período de 24 h, os provetes são pesados, para se obter a sua massa seca e posteriormente são imersos em água durante 24 h

para que fiquem saturados (Figura 31). Passado o tempo de saturação, os provetes são retirados da água e é removido o excesso de água à superfície com a ajuda de um pano ou de papel absorvente, para serem pesados e assim ser obtida a sua massa saturada. Depois desta pesagem, é determinado o seu volume com recurso a um sistema hidrostático (Figura 32) em que o provete é imerso em água e é registada a sua massa aparente imersa.



Figura 31 - Provetes imersos em água durante 24 h



Figura 32 - Provete imerso no sistema hidrostático

Das pesagens efetuadas, é possível determinar o volume do provete, em m^3 através da equação (5):

$$V_p = \frac{m_{sat} - m_i}{\rho_w} \quad (5)$$

Em que:

V_p - volume do provete [m^3];

m_{sat} - massa saturada do provete [kg];

m_i - massa aparente do provete quando imerso no sistema hidrostático [kg];

ρ_w - massa volúmica da água [kg/m^3].

Tendo sido calculado o volume, a massa volúmica é o quociente da massa seca pelo volume como é descrito na equação (6):

$$\rho_p = \frac{m_{sec}}{V_p} \quad (6)$$

Em que;

ρ_p - massa volúmica do provete [kg/m^3];

m_{sec} - massa seca do provete [kg];

V_p - volume do provete.

Como é sabido, a massa volúmica da água é de 1 kg/dm^3 , o que leva a que a expressão da massa volúmica do provete possa ser reescrita da seguinte forma como se apresenta na equação (7):

$$\rho = \frac{m_{sec}}{(m_{sat} - m_i) * 10^{-3}} \quad (7)$$

4.7.7. Absorção de água

O procedimento deste ensaio é semelhante ao do ensaio de determinação da massa volúmica descrito no ponto 4.7.6. com a diferença de que os provetes não são imersos em água num sistema hidrostático, sendo que apenas são pesados quando secos e quando saturados.

A equação (8) traduz o teor de absorção de água de um provete e é a seguinte:

$$\% \text{ de absorção de água} = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sec}} * 100 \quad (8)$$

5. Apresentação e discussão de resultados

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados no programa experimental que foi descrito no Capítulo 4. Os resultados dos ensaios permitem caracterizar as argamassas no seu estado fresco e no seu estado endurecido e comparar as diferenças das argamassas correntes daquelas que contêm uma percentagem de substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado.

Todos os resultados são apresentados pela ordem de descrição dos métodos de determinação no Capítulo anterior, contudo, os resultados do ensaio de reologia estão separados dos resultados dos restantes ensaios no estado fresco, dada a sua importância neste trabalho. Sempre que seja necessário recorrer-se-á à exposição de imagens para ilustrar ou explicar alguma situação que se mostre pertinente.

Sempre que for oportuno, os resultados serão comparados com as exigências normativas que são definidas na Norma EN 998-1:2003 e que foram descritos no ponto 2.4. deste trabalho.

5.2. Caracterização das argamassas no estado fresco

Neste ponto são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados às argamassas no estado fresco, nomeadamente o ensaio de consistência por espalhamento e o ensaio de massa volúmica aparente.

5.2.1. Consistência por espalhamento ou *flow table*

Tal como já foi referido no ponto 4.4. do presente trabalho, o primeiro objetivo da realização do ensaio foi definir a proporção em massa de água de amassadura necessária para se obter um valor na mesa de espalhamento de 190 ± 10 mm. Na Tabela 5 podem-se ver os valores obtidos nos ensaios de consistência por espalhamento ou *flow table*.

Tabela 5 - Valores de espalhamento obtidos no ensaio de consistência por espalhamento ou *flow table*

Mistura	Percentagem de vidro	Percentagem de água	Diâmetro (mm)		Diâmetro médio (mm)
Referência	0%	20% (480 g)	245	242	243,5
		17% (408 g)	187	190,5	188,8
1	50%	17% (408 g)	180	183	181,5
2	75%	17% (408 g)	207	208	207,5
3	100%	17% (408 g)	201	206	203,5

Como pode ser observado na tabela anterior, para uma argamassa de referência - não contendo nenhuma percentagem de vidro - uma percentagem de água de 20% que corresponde a uma massa de 480 g obtém-se um valor na mesa de espalhamento superior ao desejado. Como tal, arbitrou-se um valor de percentagem de água de 17%, que corresponde a uma massa de 408 g, e voltou-se a realizar o ensaio, obtendo-se já um valor médio que se encontra dentro do intervalo pretendido inicialmente, de 190 ± 10 mm.

Após estar fixado o valor de água a ser usado para todas as argamassas, os resultados obtidos apenas diferem devido à substituição dos agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado. Os resultados apontam que a argamassa com percentagem de substituição de 50% vidro apresenta um valor mais baixo no ensaio de espalhamento. Fazendo uma substituição de 75%, obtém-se o valor de espalhamento mais alto, ou seja, uma argamassa com uma maior fluidez e menos consistente. Contrariando a tendência de aumento da fluidez com o aumento da substituição de areia natural por vidro, o resultado obtido para uma percentagem de 100% é bastante similar aquele que foi obtido para 75%, com uma diferença inferior a 2%. Para uma percentagem de 50% de vidro a influência do vidro pode ser entendida como sendo resultante da interferência da forma das partículas. Note-se que a argamassa com 50% de areia de vidro apresenta um valor cerca de 4% inferior ao apresentado pela argamassa de referência.

O grande aumento na fluidez observado nas argamassas com as maiores percentagens de vidro deve-se ao facto de os agregados de vidro serem praticamente impermeáveis e uma superfície menos rugosa quando comparados com os agregados de areia natural (Penacho et al., 2014). Já os resultados obtidos para uma percentagem de 50% parecem indicar que esta quantidade de agregados de vidro não são suficientes para contrariar a absorção de água por parte das partículas do agregado de areia natural, podendo haver mesmo uma incompatibilidade nas formas dos agregados - areia natural com uma forma quase esférica e os agregados de vidro com uma tendência mais lamelar - que levou a que houvesse uma diminuição do espalhamento da argamassa. Observações de Oliveira *et al.* (2012) identificaram uma tendência do vidro em apresentar forma lamelar após britagem. Embora esta alegação exija um maior número de réplicas ou seja de ensaios de fluidez ou espalhamento, prorroga-se ao estudo reológico a confirmação ou não dessa tendência, ou seja do efeito de interferência de partículas.

5.2.2. Ensaio de massa volúmica aparente

Os valores obtidos no ensaio de massa volúmica aparente das argamassas estudadas no estado fresco são os apresentados na Figura 33. Note-se que a argamassa apresentada na Tabela 5 que contém uma percentagem de água de 20% não cumpriu o requisito imposto no ensaio de consistência por espalhamento e como tal, não foi submetida ao ensaio de massa volúmica aparente nem a qualquer outro ensaio.

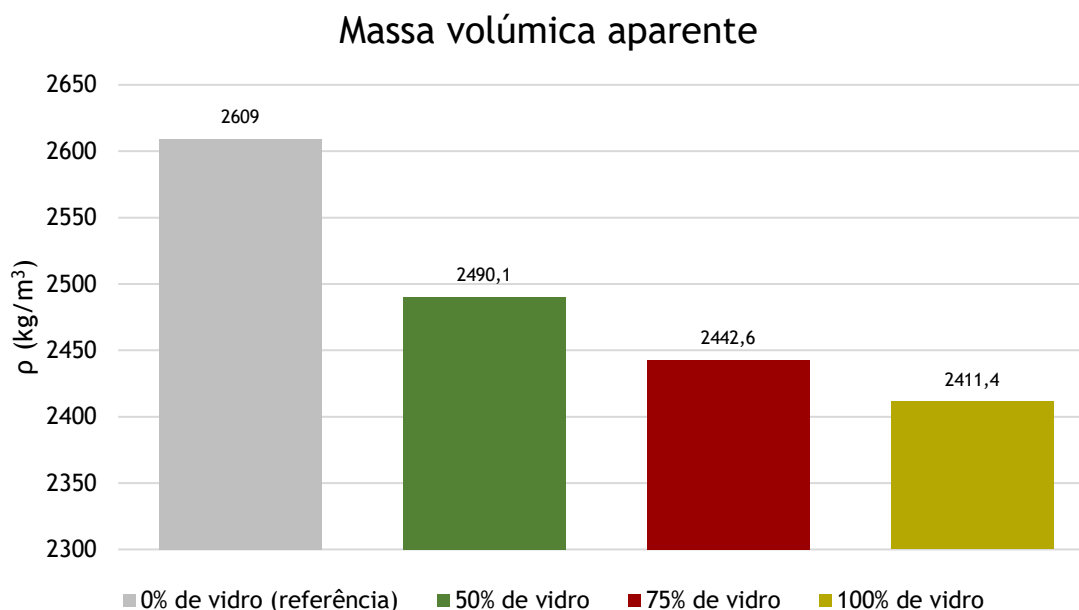


Figura 33 - Massa volúmica aparente das argamassas no estado fresco

Com a observação do gráfico da figura anterior, nota-se uma clara diminuição da massa volúmica com o aumento da percentagem de substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado. Esta diminuição pode ser explicada pelo facto de o vidro ter uma massa volúmica inferior à da areia natural, o que vai fazer que quanto mais se substitua a areia natural por areia de vidro reciclado menor será o valor da massa volúmica da argamassa resultante dessa mistura.

5.3. Caracterização reológica das argamassas

Para o estudo reológico das argamassas do presente trabalho, foi usado no reómetro Viskomat NT um perfil “step” - descrito no ponto 4.6.3. O perfil step permite homogeneizar o valor de torque para determinados pontos singulares de velocidade de rotação e assim definir melhor os parâmetros reológicos das argamassas. A relação gráfica da leitura de torque x velocidade obtidas nas argamassas estudadas são os apresentados na Figura 34. Como pode ser observado, é necessário um elevado impulso inicial para desagregação das partículas (*breakdown*) e colocar a argamassa em movimento. Após esta “inércia” inicial, as partículas tendem a estabelecer ligações menos coesas o que faz diminuir o torque, sendo que o aumento da velocidade também contribui para que tal aconteça. A argamassa que apresenta um maior valor de torque inicial é a argamassa com 75% de agregados de vidro sendo que o menor valor é apresentado pela argamassa com 50% de agregados de vidro. Tanto a argamassa de referência como a argamassa com 100% de agregados de vidro apresentam valores intermédios e bastante aproximados entre si. Tendo em vista essa característica de inércia das argamassas, que depende do seu histórico de mistura e repouso antes do ensaio, os parâmetros reológicos são obtidos com a curva descendente ou seja aquela de reconstrução.

Reologia (perfil de "step")

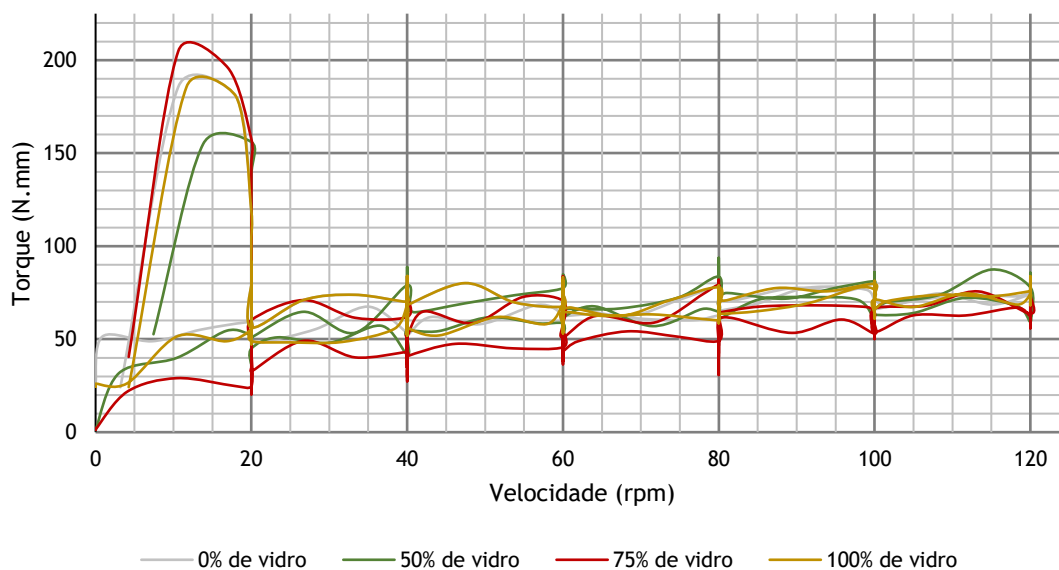


Figura 34 - Curvas de cedência Torque x Velocidade para todas as argamassas em estudo

O comportamento tixotrópico descrito no ponto 3.3. pode-se observar nas curvas de cedência da figura. Usando o *software AutoCad 2014* foram medidas as áreas de histerese das curvas de cedência Torque x Velocidade de cada uma das argamassas sujeitas ao ensaio reológico obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 6. Com o aumento da percentagem de substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro aumenta a área de histerese das curvas, que corresponde à energia necessária para a destruição da estrutura da argamassa. O facto de a área ser maior, significa que na fase decrescente de velocidade, o reómetro necessita de aplicar menos torque o que quer dizer que o material se reconstrói com mais facilidade. Assim, pode-se concluir que o aumento da percentagem de vidro favorece a facilidade de reconstrução da estrutura das argamassas, ou seja, aumenta a tixotropia destas. Definiu-se como tixotropia o valor da área de histerese apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Tixotropia relativa das curvas de cedência Torque x Velocidade

Argamassa	Tixotropia (N.mm.min)
0% de vidro (referência)	671,7
50% de vidro	677,9
75% de vidro	741,9
100% de vidro	782,6

Tal como foi referido no ponto 3.2. deste trabalho, o modelo de caracterização reológica que é considerado o mais apropriado para caracterizar misturas à base de cimento é o modelo de Bingham e como tal, os parâmetros reológicos serão obtidos segundo esse modelo e apresentados na Tabela 7. As curvas que são mais adequadas para a determinação dos

parâmetros reológicos são aquelas que são obtidas em regime de velocidade decrescente, como já mencionado anteriormente, pois é nesta fase que ocorre o fenômeno de reconstrução estrutural da argamassa, ainda que apenas parcialmente (Figuras 35, 36, 37 e 38).

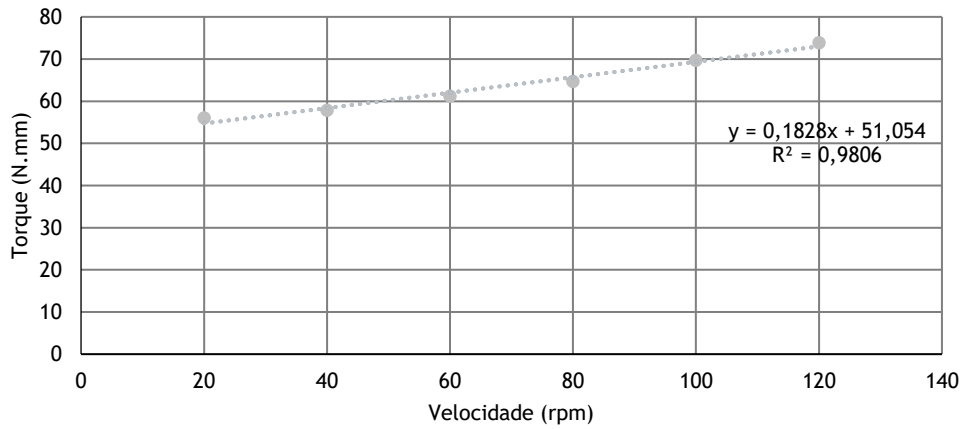


Figura 35 - Torque x Velocidade para a argamassa de referência

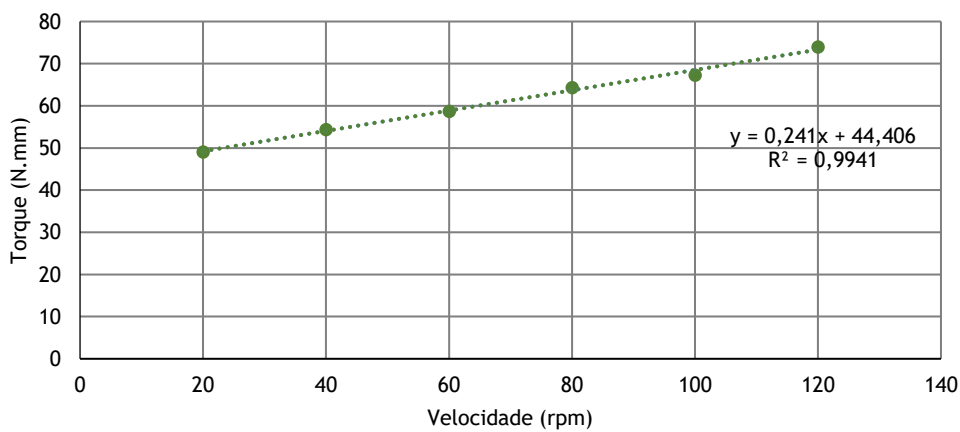


Figura 36 - Torque x Velocidade para a argamassa com 50% de vidro

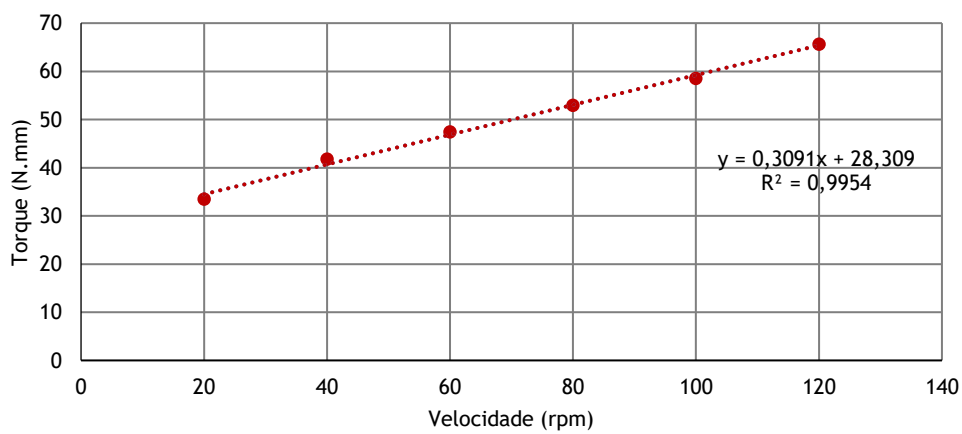


Figura 37 - Torque x Velocidade para a argamassa com 75% de vidro

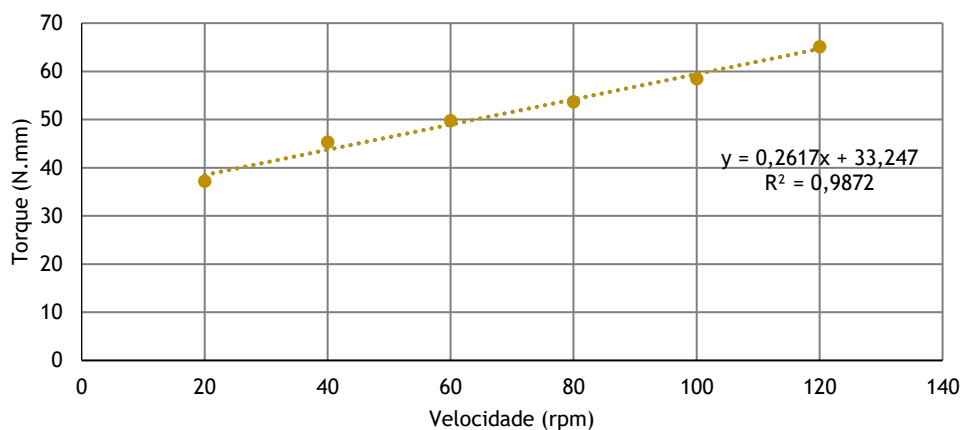


Figura 38 - Torque x Velocidade para a argamassa com 100% de vidro

Tabela 7 - Equações do modelo reológico de Bingham (perfil de “step”) e parâmetros reológicos

Argamassa	Modelo de Bingham	R ²	T ₀	μ
	T = T ₀ + μv			
0% de vidro (referência)	T = 51,054 + 0,1828v	0,9806	51,054	0,1828
50% de vidro	T = 44,406 + 0,241v	0,9941	44,406	0,241
75% de vidro	T = 28,309 + 0,3091v	0,9954	28,309	0,3091
100% de vidro	T = 33,247 + 0,2617v	0,9872	33,247	0,2617

Em que:

T - Torque [N.mm];

T_0 - Tensão de cedência relativa;

μ - Viscosidade plástica relativa;

v - Velocidade.

A argamassa que apresenta um valor de tensão de cedência inferior é a que tem uma percentagem de agregados vidro de 75%, seguida da argamassa com 100% de agregados de vidro e daquela com 50%. Dos ensaios de caracterização reológica pode-se concluir que qualquer substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro na composição das argamassas resulta numa redução da tensão de corte de pelo menos 13%.

Os resultados obtidos no ensaio de caracterização reológica estão quase em concordância total com aqueles que foram obtidos no ensaio de consistência por espalhamento ou *flow table* apresentados no ponto 5.2.1. apenas a com exceção da argamassa com 50% de agregados de vidro. Tal como já foi referido, a argamassa que apresentou um menor valor de tensão de cedência foi a que contém 75% de agregados de vidro sendo também esta a que no ensaio de

flow table demonstrou uma menor consistência e maior espalhamento. A argamassa de 100% também segue o mesmo padrão do ensaio de consistência, sendo aquela que apresenta o segundo valor mais elevado de espalhamento neste ensaio e também o segundo valor mais elevado de tensão de cedência no ensaio reológico. Já a argamassa com 50% de vidro, no ensaio reológico apresenta um valor de tensão de cedência inferior ao da argamassa de referência, o que não está em concordância com os resultados obtidos no ensaio de consistência por espalhamento, apresentando uma consistência inferior ao da argamassa de referência, ainda que os seus valores sejam relativamente próximos, como pode ser observado na Figura 39.

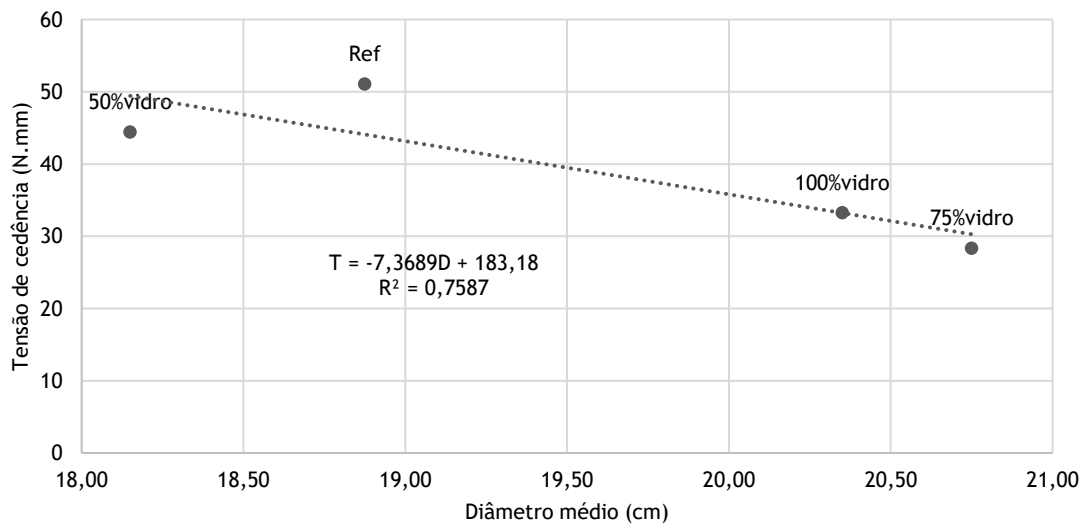


Figura 39 - Comparação da tensão de cedência (ensaio reológico) com o diâmetro de espalhamento (*flow table*)

Do gráfico pode-se concluir que há uma tendência de relação direta entre a tensão de cedência relativa e o diâmetro médio medido na mesa de espalhamento. Apesar de esta tendência não ser diretamente proporcional à percentagem de agregados finos de vidro usada, é claro que para os maiores valores de substituição, a tensão de cedência e o diâmetro de espalhamento sofrem uma diminuição.

Esta relação pode ser explicada pela forma das partículas. Numa argamassa com 100% de agregados de vidro, apesar de haver mais água disponível devido à maior impermeabilidade do vidro em relação à areia natural, o efeito de forma das partículas de vidro pode aumentar a tensão de cedência. Contudo, visto que as diferenças entre os diâmetros médios de cada argamassa são mínimas, estas podem ser devidas à precisão do ensaio, pelo que estas conclusões podem ser pouco exatas.

Os valores das áreas de histerese (indicador de comportamento tixotrópico) aumentam com o aumento da percentagem de substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro, o mesmo não se passa com os valores dos parâmetros reológicos, pelo que não é possível estabelecer uma relação entre eles.

5.4. Caracterização das argamassas no estado endurecido

Neste ponto serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados às argamassas no estado endurecido já descritos no ponto 4.7., nomeadamente o ensaio de ultrassons, de resistência mecânica à flexão e à compressão, de absorção de água por capilaridade, de massa volúmica e de absorção de água.

5.4.1. Ensaio de ultrassons

Os resultados dos tempos de propagação dos impulsos, as dimensões e massa de cada provete ensaiado e a resultante velocidade de propagação da onda ultrassónica são apresentados a seguir, na Tabela 8.

Tabela 8 - Características dos provetes e cálculo da velocidade de propagação da onda ultrassónica

	Provete	Dimensões (cm)	Massa (g)	Tempo de propagação (μ s)	Velocidade (km/s)	Velocidade média (km/s)
0% de vidro (referência)	1	17,82x4,1x4,03	593,80	51,90	3,43	3,38
	2	17,78x4,11x3,8	566,60	54,80	3,24	
	3	17,76x4,11x4,0	580,30	51,40	3,46	
50% de vidro	1	18x4,16x3,98	591,90	54,50	3,30	3,48
	2	18x4,1x3,99	580,50	51,70	3,48	
	3	18,2x4,04x3,95	575,80	49,60	3,67	
75% de vidro	1	18,2x4,14x3,98	579,10	52,50	3,47	3,48
	2	18,1x4,1x3,95	579,50	51,80	3,49	
	3	18x4,14x3,9	567,80	51,90	3,47	
100% de vidro	1	18,1x4,04x3,97	541,00	54,10	3,35	3,40
	2	18,2x4,1x3,98	543,30	53,30	3,41	
	3	18,1x4,02x3,98	545,30	52,50	3,45	

Com estes valores pode ser calculado o módulo de elasticidade dinâmico, tal como foi descrito no ponto 4.7.2. deste trabalho. Para o valor de ρ (massa volúmica) foram usados os valores médios obtidos no ensaio de massa volúmica no estado endurecido e que são apresentados mais à frente neste trabalho, no ponto 5.4.5. No gráfico da Figura 40 apresentam-se os valores do módulo de elasticidade dinâmico que foram calculados.

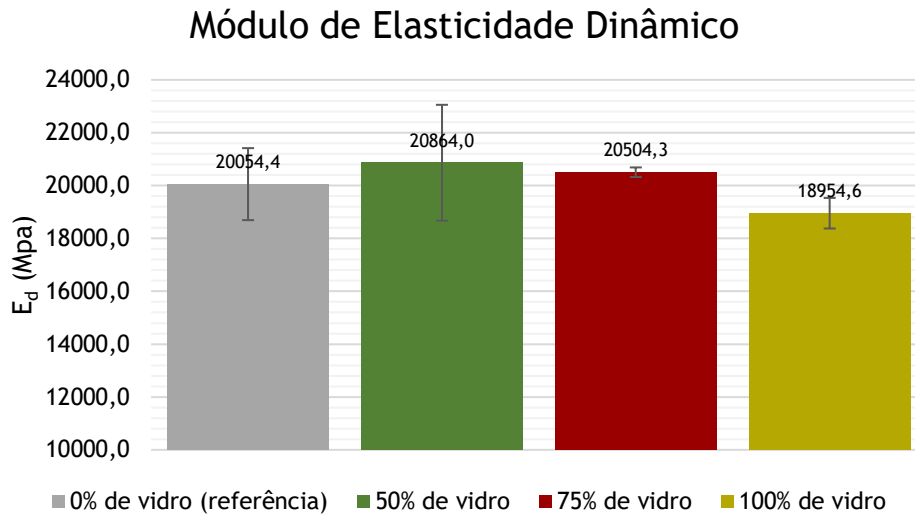


Figura 40 - Módulos de elasticidade dinâmicos

Tendo em conta os resultados médios obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico de cada argamassa e os seus respetivos desvios padrão, apresentados na Figura 40, pode-se concluir que a substituição da areia natural pela areia de vidro não altera significativamente o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. Porém pode-se afirmar que há uma ligeira diferença entre as argamassas com 75% e com 100% de vidro, sendo que esta última apresenta um valor significativamente mais baixo que as restantes. As diferenças entre os valores médios das outras argamassas é esbatido pelos respetivos desvios padrão.

5.4.2. Resistência mecânica à flexão

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica à flexão são os apresentados na Figura 41.

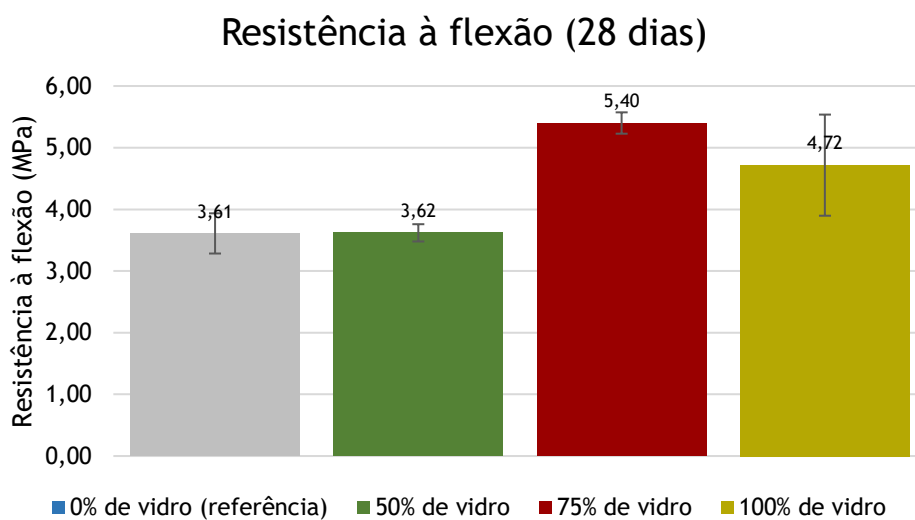


Figura 41 - Resistência mecânica à flexão das argamassas aos 28 dias

Dos resultados pode-se observar que em todas as argamassas com agregados de vidro há um aumento da resistência mecânica à flexão, ainda que a diferença entre a argamassa de referência e a argamassa com 50% de agregados de vidro seja insignificante se tivermos em conta os respectivos desvio padrão. A argamassa de referência apresenta um valor médio de 3,61 MPa e a argamassa de 50% tem um valor médio de 3,62 MPa. Já a argamassa com uma substituição de 75% é a que apresenta os maiores valores de resistência mecânica à flexão, com uma média de 5,40 MPa. A argamassa com 100% de agregados de vidro apresenta um valor médio de 4,72 MPa. Contudo, por análise do desvio padrão, conclui-se que não há uma grande diferença na resistência à flexão entre as argamassas com 75% e 100% de agregados de vidro. Observa-se um aumento de resistência à flexão da ordem dos 33% entre a argamassa de referência e a argamassa com 75% de vidro.

5.4.3. Resistência mecânica à compressão

Na Figura 42 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão das argamassas ensaiadas.

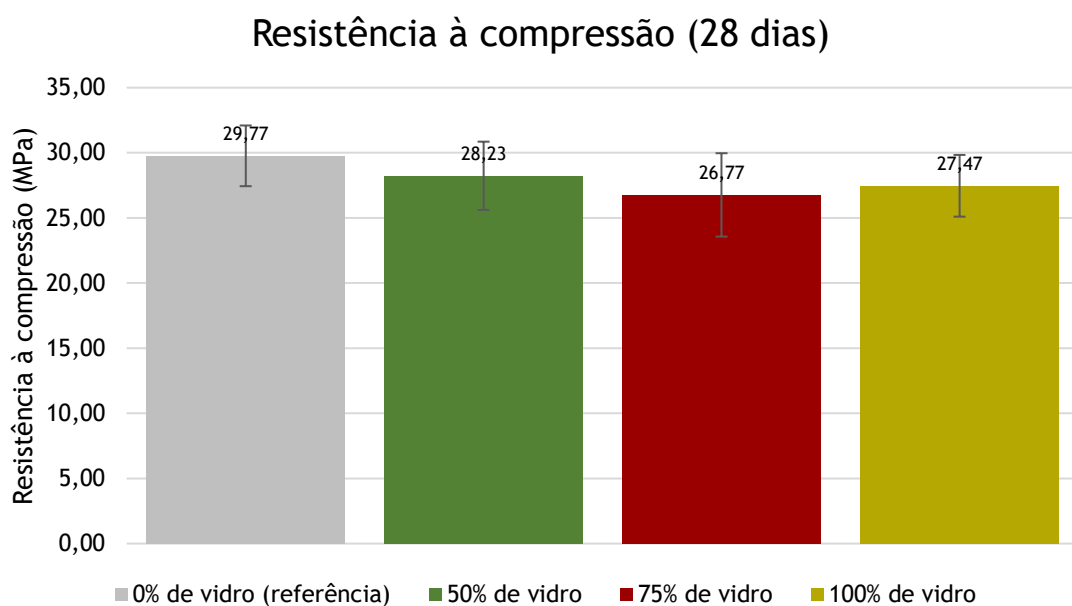


Figura 42 - Resistência mecânica à compressão das argamassas aos 28 dias

Da análise dos resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão, as conclusões que se podem retirar são exatamente o oposto daquelas que foram retiradas dos resultados dos ensaios de resistência mecânica à flexão, ainda que percentualmente, neste ensaio os valores sejam mais próximos entre si do que no ensaio de flexão. A argamassa que obteve uma média de valores mais elevada foi a argamassa de referência, 29,77 MPa, seguida da argamassa de 50% com uma média de valores de 28,23 MPa. Aquela que apresentou o valor médio mais baixo, de 26,77 MPa, foi a argamassa com 75% de agregados de vidro. A argamassa com uma percentagem de 100% de agregados de vidro apresentou uma média de valores de 27,47 Mpa.

Entre a argamassa de referência e a argamassa com 75% de vidro, há uma perda de resistência à compressão de aproximadamente 10%.

As diferenças que foram referidas anteriormente podem ser desprezadas se tivermos em conta os desvios padrão de cada argamassa. Estes sobrepõem-se aos valores médios o que nos leva a concluir que não há uma diminuição assim tão grande da resistência mecânica à compressão com o aumento da substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos reciclados de vidro.

Na Norma onde são especificados os requisitos mínimos a seguir pelas argamassas, a EN 998-1:2003, uma argamassa de uso geral deve ter uma resistência à compressão que se encontre entre as categorias CS I e CS IV, ou seja, de $0,4 \text{ N/mm}^2$ até $\geq 6 \text{ N/mm}^2$, ou seja, todas as argamassas estudadas se enquadram na categoria CS IV, pois todas têm uma resistência à compressão superior a 6 N/mm^2 .

5.4.4. Absorção de água por capilaridade

Os valores dos coeficientes de capilaridade foram calculados usando os valores médios obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade. Devido a um erro no laboratório, para as argamassas de referência e de 50% de vidro apenas foram ensaiados 4 provetes de cada, enquanto que para as argamassas de 75% e 100% de vidro foram ensaiados 6 provetes de cada uma. Os resultados obtidos dos coeficientes de capilaridade são apresentados na Figura 43.

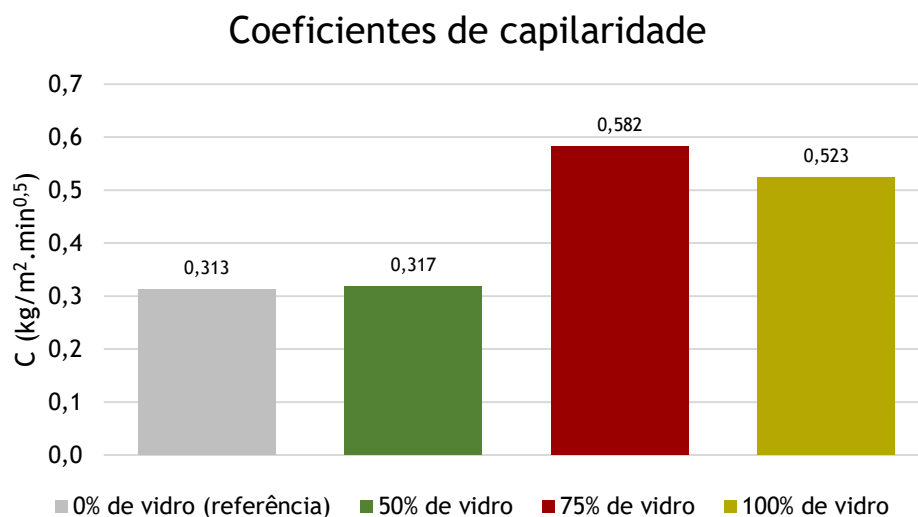


Figura 43 - Coeficientes de capilaridade das argamassas

Por análise dos resultados apresentados no gráfico da Figura 43 pode-se concluir que uma substituição de 50% de agregados de areia natural por agregados de vidro quase não influencia o valor do coeficiente de capilaridade, conclusão esta que é confirmada pela análise dos desvios padrão de cada um. Já para um valor de substituição de 75%, este coeficiente atinge o seu valor máximo, havendo um aumento na ordem dos 45% em relação à argamassa de referência. Já

para a argamassa com 100% de agregados de vidro, o valor do coeficiente de capilaridade é um pouco mais baixo, havendo uma diminuição de cerca de 11% em relação ao valor da argamassa de 75%. Esta diferença é atenuada em parte pela análise dos desvios padrão de cada um, mas continua-se a poder afirmar que a argamassa com 75% de agregados de vidro é aquela que apresenta um coeficiente de capilaridade mais elevado, sendo este bastante próximo do obtido pela argamassa de 100%.

Absorção de capilar

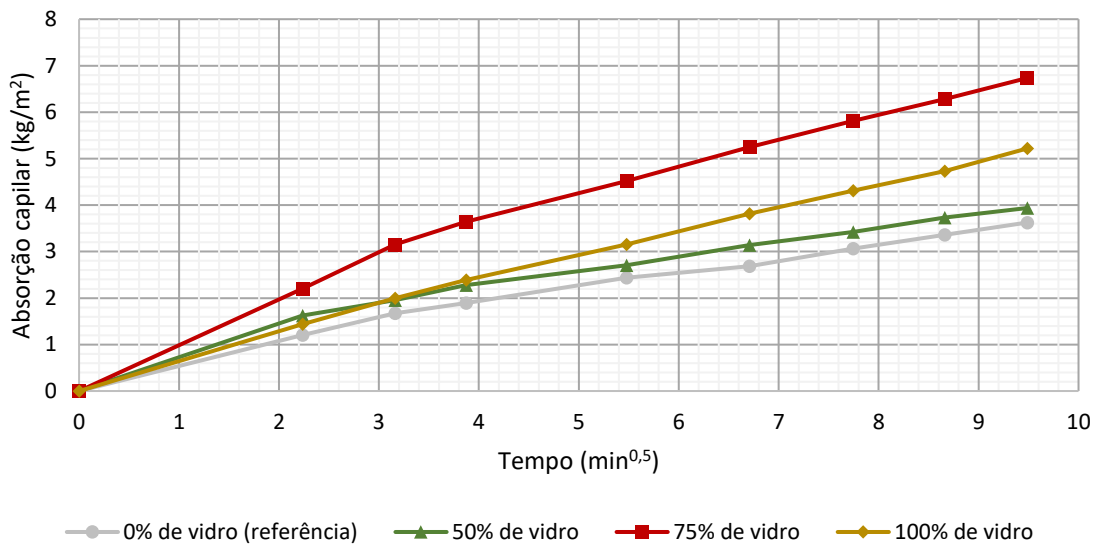


Figura 44 - Absorção capilar das argamassas

Analisando os gráficos da Figura 44 pode-se verificar que o comportamento da absorção capilar segue uma tendência que está em plena concordância com os valores obtidos para os coeficientes de capilaridades de cada argamassa. Há uma grande proximidade de valores entre a argamassa de referência e a argamassa de 50%. Numa fase inicial a argamassa com 100% de vidro segue uma tendência muito próxima das outras duas já referidas, começando-se a distanciar perto dos 4 min^{0,5}. Já a argamassa com 75% de agregados de vidro, a absorção de água por capilaridade é muito superior às outras logo desde os primeiros instantes, atingindo valores perto do dobro daqueles que foram registados para a argamassa de referência.

Segundo a Norma EN 998-1:2003 que define as especificações e requisitos que devem ser cumpridos para as argamassas, o coeficiente de capilaridade de uma argamassa para uso geral deve estar dentro das categorias W0 a W2. A categoria W2 é para coeficientes de capilaridade inferiores a 0,20 kg/m².min^{0,5}. Na categoria W1 ($c \leq 0,40$ kg/m².min^{0,5}) enquadram-se a argamassa de referência e a argamassa com 50% de agregados de vidro. As outras duas argamassas enquadram-se na categoria W0 para a qual não são especificados quaisquer valores máximos para o coeficiente de capilaridade.

5.4.5. Massa volúmica

Na Tabela 9 são apresentados os valores obtidos no ensaio de massa volúmica no estado endurecido que permitem calcular o valor da massa volúmica seca das argamassas em estudo segundo o procedimento de cálculo já descrito no ponto 4.7.6. do presente trabalho.

Tabela 9 - Valores das massas obtidas no ensaio de massa volúmica no estado endurecido

Provete		Massa seca (g) - m_{sec}	Massa húmida (g) - m_{sat}	Massa imersa (g) - m_i
0% de vidro (referência)	1	268	297,8	161
	2	279	310,1	166,6
	3	271,6	301,8	162,6
50% de vidro	1	253,8	281,1	148,3
	2	251,6	277,7	145,6
	3	258,2	285,2	149,4
75% de vidro	1	241,7	267,4	140,1
	2	230,4	255,6	132,5
	3	238,7	247,5	137,4
100% de vidro	1	262,9	289,3	148,3
	2	253,1	287,8	140,7
	3	258,4	284,1	146

Os valores da massa volúmica seca para as argamassas em estudo, calculados segundo a expressão anterior, são os apresentados na Figura 45:

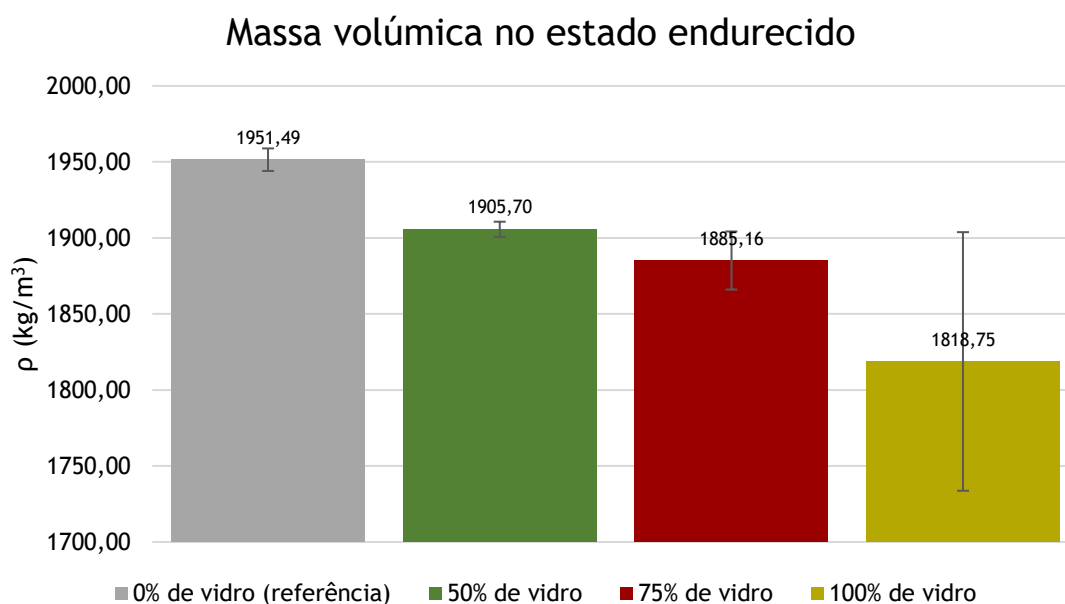


Figura 45 - Massa volúmica das argamassas no estado endurecido

Por análise da Figura 45, pode-se observar a mesma tendência de redução do valor da massa volúmica com o aumento da percentagem de substituição de areia por vidro que foi observada nas argamassas no estado fresco. No terceiro provete de 75% de vidro, o valor foge bastante à tendência, o que pode ter sido causado por algum erro de pesagens no laboratório.

Fazendo uma comparação dos valores médios - excluindo o terceiro provete de 75%. A média de valores para a argamassa de referência é de 1951,49 kg/m³ sendo o valor mais elevado, seguido da argamassa de 50% de vidro com 1905,70 kg/m³, da argamassa de 75% com uma média de 1885,16 kg/m³ (1979,45 kg/m³ se se considerarem todos os provetes) e finalmente da argamassa com uma percentagem de vidro de 100% com um valor médio de 1818,75 kg/m³.

Fazendo uma análise dos desvios padrão, pode-se concluir que a adição de vidro, qualquer que seja a percentagem, resulta numa diminuição significativa do valor da massa volúmica dos provetes. Já entre as argamassas com agregados de vidro, as diferenças são atenuadas pelos valores dos desvios padrão, principalmente pelo da argamassa com 100% de agregados de vidro. Este valor bastante elevado do desvio padrão, pode indicar que também aqui houve algum erro no ensaio.

5.4.6. Absorção de água

Os valores para o cálculo do teor de absorção de água foram obtidos segundo o que foi descrito no ponto 4.7.7. deste trabalho, e são apresentados na Tabela 10 bem como os resultados do cálculo do teor de absorção de água.

Tabela 10 - Valores das massas obtidas no ensaio de massa volúmica no estado endurecido

Provete		Massa seca (g) - m _{sec}	Massa húmida (g) - m _{sat}	Absorção de água (%)
0% de vidro (referência)	1	268	297,8	11,12
	2	279	310,1	11,15
	3	271,6	301,8	11,12
50% de vidro	1	253,8	281,1	10,76
	2	251,6	277,7	10,37
	3	258,2	285,2	10,46
75% de vidro	1	241,7	267,4	10,63
	2	230,4	255,6	10,94
	3	238,7	247,5	3,69
100% de vidro	1	262,9	289,3	10,04
	2	253,1	287,8	13,71
	3	258,4	284,1	9,95

Dos valores obtidos e apresentados na tabela, foi construído o gráfico da Figura 46.

Teor de absorção de água

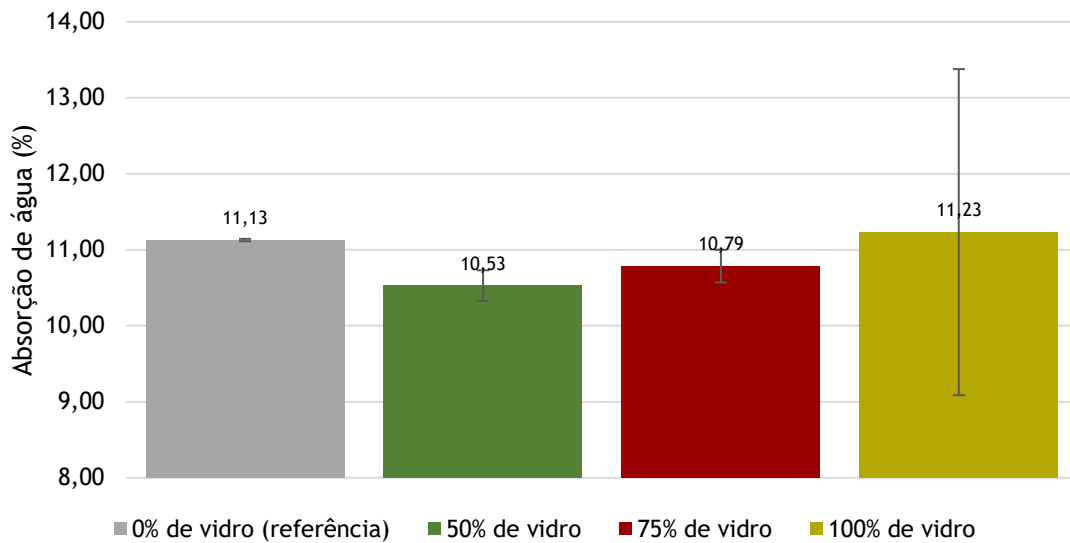


Figura 46 - Teor de absorção de água das argamassas

Tal como aconteceu no ponto 5.4.5. e visto que os dados foram obtidos no mesmo ensaio, o terceiro provete de 75% apresenta um valor que está bastante afastado da tendência que seria de esperar e portanto os valores médios apresentados no gráfico não incluem esse valor.

A argamassa que apresenta um maior valor médio do teor de absorção de água é aquela com 100% de agregados de vidro com um teor de 11,23%. Com um valor bastante próximo deste, a argamassa que apresenta o segundo maior valor médio do teor de absorção de água é a argamassa de referência com 11,13%. Com 10,79% de valor médio (8,42% se foram considerados todos os provetes), a argamassa que contém 75% de agregados de vidro é a que apresenta o segundo valor médio mais baixo para o teor de absorção de água. A argamassa com 50% de vidro obteve o valor mais baixo com 10,53%.

Também aqui e tal como aconteceu na análise do ponto 5.4.5., as diferenças dos valores médios são anuladas pelos respetivos desvios padrão, principalmente do da argamassa com 100% de agregados de vidro, indiciando novamente algum erro de medições no laboratório. Ainda assim, pode-se concluir que uma substituição de 50% de agregados de areia natural por agregados de vidro reciclado resulta numa redução do teor de absorção de água em relação ao valor obtido pela argamassa de referência. O mesmo acontece com a argamassa de 75%, ainda que com uma margem mais reduzida.

6. Conclusões

6.1. Conclusões

Esta dissertação pretendeu estudar o comportamento mecânico e reológico de argamassas contendo agregados finos reciclados de resíduos de vidro através de um programa experimental desenvolvido para estudar os parâmetros que se entendeu que melhor caracterizam as argamassas e o seu comportamento tendo em conta as alterações na sua composição.

O programa experimental desenvolvido nesta dissertação e a análise dos resultados nele obtidos permite tirar as seguintes conclusões:

- A introdução de agregados de vidro diminui a consistência da argamassa no estado fresco, não sendo ainda assim diretamente proporcional ao aumento da percentagem de vidro da mistura. Esta diminuição da consistência pode ser explicada pela maior impermeabilidade dos agregados de vidro quando comparados com os agregados de areia natural. A não linearidade dos resultados pode ser devida à incompatibilidade da forma dos agregados de vidro com os agregados de areia natural.

- Devido à menor massa volúmica do vidro quando comparado com a areia natural, o aumento da percentagem de vidro na argamassa resulta numa diminuição linear da massa volúmica aparente desta no estado fresco.

- O comportamento tixotrópico das argamassas aumenta com o aumento da percentagem de agregados de vidro presentes na mistura. Com o aumento da referida percentagem, as áreas de histerese aumentam também o que significa que a reconstrução do material é favorecido pela introdução de agregados de vidro.

- A substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado resulta numa redução do valor da tensão de cedência relativa. Esta conclusão está em concordância com a que foi retirada do ensaio de consistência por espalhamento, ainda que os valores para cada percentagem de substituição não estejam em concordância a 100%.

- O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas no seu estado endurecido não é significativamente afetado pela substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado para que se possam retirar conclusões acerca da relação entre eles.

- Para percentagens de vidro superiores a 50%, a resistência mecânica à flexão das argamassas aumenta significativamente em relação à argamassa de referência, com um acréscimo da ordem dos 33%.

- A influência do uso de vidro na produção de argamassas não tem tanta influência na resistência mecânica à compressão das argamassas como tem na resistência mecânica à flexão. Ainda assim, apesar de ser por uma margem reduzida, as argamassas com percentagens de vidro

superiores a 50%, são as que apresentam valores mais pequenos, contrariando os resultados obtidos no ensaio de flexão.

- Argamassas que tenham uma percentagem de vidro superior a 50%, apresentam valores de coeficiente de capilaridade bastante superiores aos obtidos pela argamassa de referência, apresentando o seu máximo para uma percentagem de 75%.

- Os resultados da absorção capilar das argamassas seguem exatamente a tendência dos valores obtidos para os coeficientes de capilaridade.

- Seguindo a tendência que foi verificada no estado fresco, a massa volúmica dos provetes no estado endurecido diminui linearmente com o aumento da percentagem de vidro devido à menor massa volúmica dos agregados de vidro em relação aos agregados de areia natural.

- O teor de absorção de água das argamassas no estado endurecido não sofre diferenças significativas com o aumento da percentagem de vidro, sendo os valores obtidos nos ensaios demasiado aproximados para que se possam tirar conclusões.

Para se poder concluir se a substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado na produção de argamassas traz ou não vantagens quando comparado com argamassas correntes produzidas apenas com agregados de areia natural, é necessário ter-se em conta os pontos que se pretendem analisar. Quando a análise é feita no estado fresco, tanto o ensaio de consistência por espalhamento como o ensaio reológico confirmam que a introdução de agregados de vidro torna a argamassa mais fluída e menos consistente. A diferença não é significativa mas é um aspeto a ter em consideração aquando da produção e aplicação das argamassas em obra, podendo esta diferença ter que ser corrigida com a diminuição da quantidade de água. No estado endurecido, e no que ao comportamento mecânico diz respeito, os resultados do ensaio de flexão e compressão são contrários, visto que na flexão os agregados de vidro são benéficos e na compressão são prejudiciais. Ainda assim, os resultados não são impeditivos do uso de argamassas com agregados finos de vidro, pois cumprem os requisitos mínimos para argamassas de uso geral especificados na Norma EN 998-1:2003. Quanto à durabilidade das argamassas, esta é em parte comprometida pela substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado pois os parâmetros que dizem respeito à permeabilidade à água apontam para que haja um decréscimo na durabilidade das argamassas.

Finalmente pode-se concluir que a reciclagem de vidro na forma de areia como substituto parcial da areia natural é viável e sobretudo benéfica, não só do ponto de vista do desempenho tecnológico das argamassas, mas como um contributo na redução dos impactos ambientais e na sustentabilidade da construção civil.

6.2. Propostas para trabalhos futuros

Em trabalhos que possam ser desenvolvidos no futuro acerca desta temática poderão ser feitos os seguintes estudos:

- Fazer-se uma análise semelhante aos mesmos parâmetros, mas fazendo acertos nas percentagens de mistura, de forma a que a consistência fosse mantida e poder-se tirar outras conclusões tanto na análise reológica como também no estado endurecido.
- Estudar-se a durabilidade mais aprofundadamente, com outros ensaios como por exemplo de retração, e de aderência (mais indicado para argamassas de revestimento). Pode também ser considerado neste âmbito, o estudo das reações alcali-sílica.
- De forma a estudar a fundo a influência económica da substituição de agregados finos de areia natural por agregados finos de vidro reciclado, fazer-se um estudo (de carácter regional ou nacional) do custo real da obtenção de resíduos de vidro e da sua preparação para o uso nas argamassas e comparar esse custo com o da obtenção da areia natural.

Referências bibliográficas

Alvarez, José António Sequeira (2007). *Alvenarias e Argamassas anteriores ao Império Romano*.

ASTM C 1260. 2007, Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

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

Barnes H. A., Hutton J. F., Walters K. (2000). *An introduction to Rheology*, Institute of NonNewtonian Fluid Mechanics, University of Wales, Elsevier.

Barroca, P. A. G. (2013). *Comportamento reológico e mecânico de argamassas com agregados leves*, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Bazant, Z. P., Jin, W., & Meyer, C. (1998). *Microfracturing caused by alkali-silica reaction of waste glass in concrete*. AEDIFICATIO Publishers, Fracture Mechanics of Concrete Structures,, 3, 1687-1693.

Bazant, Z. P., Zi, G., & Meyer, C. (2000). *Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes*. Journal of engineering mechanics, 126(3), 226-232.

Betioli, A. (2007). *Influência dos Polímeros MHEC e EVA na Hidratação e Comportamento Reológico de Pastas de Cimento Portland*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

British Standard, BS 1881: Part 203:1983. *Testing concrete. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*.

Chen CH, Huang R, Wu JK, Yang CC (2006). *Waste E-glass Particles used in cementitious mixtures*. Cem. Concr. Res. 2006;36:449-56.

Cordeiro, G. C., Filho, R. D. T. & Fairbairn, E. M. R. (2009). *Caracterização de Cinza do bagaço de Cana-de-açúcar para emprego Como pozolana em materiais Cimentícios*. Quim. Nova, Vol. 32, No. 1, 82-86, 2009.

Corinaldesi V, Gnappi G, Moriconi G & Montenero A. (2005). *Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars*. Waste Manage. 2005;25(2):197-201.

De Larrard, F. (1999). *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*, Spon, London.

Du, H., & Tan, K. H. (2014). *Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars*. Construction and Building Materials, 66, 275-285.

- Ducman, V., Mladenovič, A., & Šuput, J. S. (2002). *Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity*. *Cement and Concrete Research*, 32(2), 223-226.
- Erdoğan, S. T., Martys, N. S., Ferraris, C. F., & Fowler, D. W. (2008). *Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension*. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), 393-402.
- European Committee for Standardization EN 1015-10:1999. *Methods of test for mortar for masonry. Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*, Brussels.
- European Committee for Standardization EN 1015-11:1999. *Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, Brussels.
- European Committee for Standardization EN 1015-18:2002. *Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, Brussels.
- European Committee for Standardization EN 1015-2:1998. *Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*, Brussels.
- European Committee for Standardization EN 1015-3:1999. *Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, Brussels.
- European Committee for Standardization EN 1015-6:1999. *Methods of test for mortar for masonry. Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*, Brussels.
- European Committee for Standardization EN 1015-9:1999. *Methods of test for mortar for masonry. Part 9: Determination of workable life and correction time of fresh mortar*, Brussels.
- European Committee for Standardization EN 998-1:2003. *Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar*, Brussels.
- Figg, J. W. (1981). *Reaction between cement and artificial glass in concrete*. Proc. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa, 1981.
- Galvão, A. C. P., Farias, A. C. M., & Mendes, J. U. L. (2015). *Characterization of waste of soda-lime glass generated from lapping process to reuse as filler in composite materials as thermal insulation*. *Cerâmica*, 61(359), 367-373.
- Giroto, L. S., Barbosa, M. P., & Maciel, G. F. (2014). *Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto-adensável*. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 24-52.
- Harini, M., Shaalini, G., & Dhinakaran, G. (2012). *Effect of size and type of fine aggregates on flowability of mortar*, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(1), 163-168.

Hou, X., Shin, J.-H., Struble, L.J. & Kirkpatrick, R.J. (2013). *Chemical and Microstructural Changes Associated with Alkali-silica Reaction in Mortar*. 35th International Conference on Cement Microscopy 2013, Chicago, IL, USA, 28 April-1 May 2013.

Idir, R., Cyr, M., & Tagnit-Hamou, A. (2011). *Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet*. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 19-29.

J. H. Sharp (2006). *Surely we know all about cement - don't we?* - 48th Mellor Memorial Lecture.

Jin, W., Meyer, C., & Baxter, S. (2000). "Glascrete" - *Concrete with Glass Aggregate*. *ACI Materials Journal*, 97(2), 208-213.

Johnston C.D. (1974). *Waste glass as coarse aggregate for concrete*. *J. Test. Eval.* 1974;2(5):344-50.

López, D. A. R., de Azevedo, C. A. P., & Neto, E. B. (2005). *Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino*. *Cerâmica*, 51, 318-324.

McLellan, G. W., Shand, E. B., (1984). *Glass Engineering Handbook*, McGraw-Hill, Inc.

Meyer, C. & Baxter, S. (1997). *Use of recycled glass for concrete masonry blocks. Final report* (No. PB--98-158934/XAB). Columbia Univ., Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, New York, NY (United States); New York State Energy Research and Development Authority, Albany, NY (United States); Bridge Contracting, Staten Island, NY (United States).

Meyer, C. & Baxter, S., (1998). *Use of recycled glass and fly ash for precast concrete*. Rep. NYSERDA 98-18 (4292-IABR-IA-96) to New York State Energy Research and Development Authority, Dept. of Civil Eng. and Eng. Mech., Columbia University, New York.

Norma Portuguesa NP EN 1008:2003. *Água de amassadura para betões. 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*, IPQ, Lisboa.

Norma Portuguesa NP EN 197-1:2001. *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*, IPQ, Lisboa.

Norma Portuguesa NP EN 933-1:2000. *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte1: Análise Granulométrica. Método de Peneiração*, IPQ, Lisboa.

Oliveira, L. A. P., Barroca, P. A. G., & Santos, M. C. (2014). *Comportamento Reológico de argamassas com agregados leves reciclados de cortiça*, *Argamassas 2014 - Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento*, Portugal, Coimbra.

Oliveira, L. A. P., Castro-Gomes J. P. & Santos P. (2007). *Optimization on pozzolanic reaction of ground waste glass incorporated in cement mortars*. Portugal SB07 Sustainable Construction, Materials and Practices, L. Bragança et al (Eds.) IOS Press, 2007, Part 2, pp. 928-934.

- Oliveira, L. A. P., Gomes, J., & Santos, P. (2008). *Avaliação de desempenho da substituição de areia natural por areia de resíduos de vidro em betões estruturais*. Encontro Nacional de Betão Estrutural, Guimarães, Portugal.
- Oliveira, L. A. P., Castro-Gomes, J. P., & Santos, P. M. (2012). *The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components*. *Construction and Building Materials*, 31, 197-203.
- Park, S.B., Lee B. C. and Kim J. H. (2004). *Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate*. *Cement Concrete Research*, 2004, 34, 2181-2189.
- Penacho, P., de Brito, J., & Veiga, M. R. (2014). *Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate*. *Cement and Concrete Composites*, 50, 47-59.
- Pereira, R. J. P. (2011). *O desempenho reológico e mecânico de argamassas de revestimento reforçadas com fibras*, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Phillips JC, Cahn DS & Keller GW (1972). *Refuse glass aggregate in portland cement*. In: *Proceedings of 5th Mineral Waste Utilization Symposium*. Chicago, Ill: IIT Research Institute; 1972. p. 385-90.
- Pike RG, Hubbard D, Newman ES. (1960)- *Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction*. *High Res Board Bull* 1960;275:39-44.
- Pollery C, Cramer SM & De La Cruz RV (1998). *Potential for using waste glass in portland cement concrete*. *J. Mater. Civ. Eng.* 1998;10(4):210-9.
- Schmidt, A. & Saia, W. H. F. (1963). *Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work*. *ACI Mat. J.*, 1963, 60, 1235 - 1236.
- Shayan A. & Xu A. (2004). *Value-added utilization of waste glass in concrete*. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34, 81-89.
- Shi, C., & Zheng, K. (2007). *A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete*. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 234-247.
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., & Wang, H. (2005). *Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders*. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 987-993.
- Shin, J. H., Struble, L. J., & Kirkpatrick, R. J. (2015). *Microstructural Changes Due to Alkali-Silica Reaction during Standard Mortar Test*. *Materials*, 8(12), 8292-8303.
- Silva R. (2006). *Argamassas com adição de fibras: Estudo do comportamento reológico e mecânico*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, São Paulo.

Sousa J. G., Bauer E. (2002) - *Estudo da Reologia das argamassas de revestimento no estado fresco*, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Brasil, Natal.

Sousa L. (1995). *Reciclagem de vidro em embalagem*. Revista AEP Ambiente (2): 1-3.

Stolz, C. M. (2011). *Influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Terro, M. J. (2006). *Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures*. Building and environment, 41(5), 633-639.

Topçu I.B., Canbaz M (2004). *Properties of concrete containing waste glass*. Cem. Concr. Res. 2004;34:267-74.

Topçu, I.B., Boğa, A. R., & Bilir, T. (2008). *Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3* . Waste Management, 28(5), 878-884.

Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., & Forsberg, E. (2008). *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*, Cement and Concrete Composites, 30(4), 274-282.

World Bank (2012). *What a waste - A Global Review of Solid Waste Management - Urban Development Series Knowledge Papers*. Washington DC: World Bank.

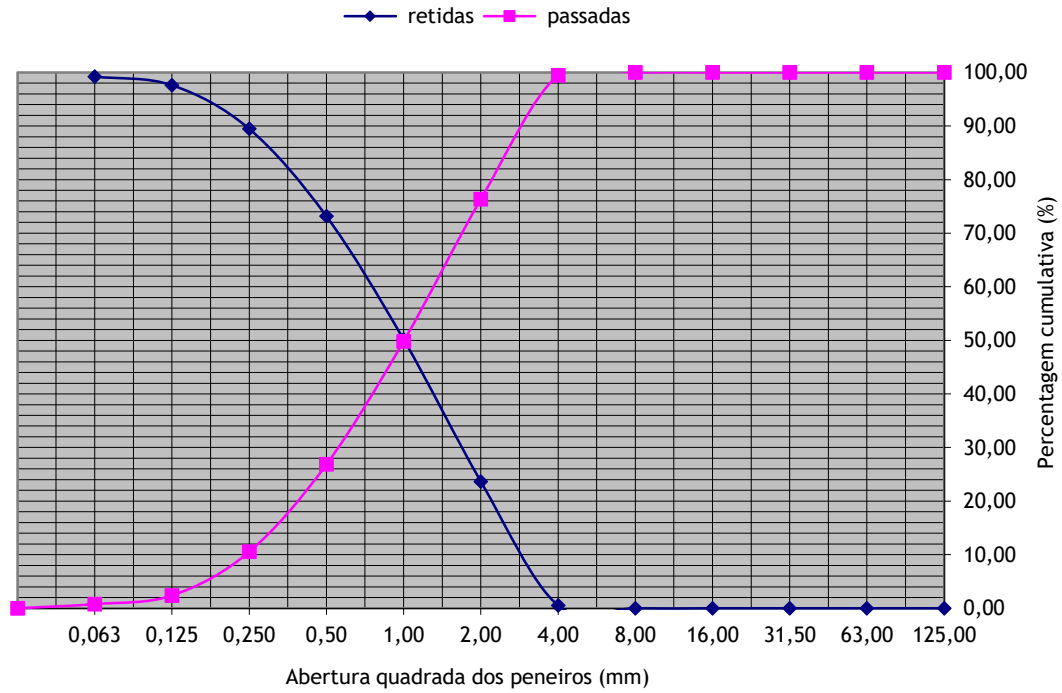
Zhu, H. Y., & Byars, E. A. (2004). *Alkali-silica reaction of recycled glass in concrete, alkali-aggregate reaction in concrete*. 12th international conference on Alkali-Aggregate reaction in concrete, Beijing (pp. 811-820).

Anexos

Anexo I - Granulometria da areia natural

Amostra inicial (gramas):	601,1	Nº de fracções: 3	Observações: Areia natural		
Malha (mm)	Massa do Peneiro (g)	Fracção 1 Peneiro + Inerte (g)	Fracção 2 Peneiro + Inerte (g)	Fracção 3 Peneiro + Inerte (g)	Total das Fracções Massa do Inerte (g)
4,00	1002,6	1004,3	1003,1	1003,6	3,2
2,00	992,6	1049,0	1034,7	1031,6	137,5
1,00	921,8	986,6	970,1	966,4	157,7
0,50	820,1	868,6	864,3	864,1	136,7
0,250	780,7	807,1	814,0	818,0	97,0
0,125	743,3	752,4	761,3	764,6	48,4
0,063	760,1	762,1	763,5	764,3	9,6
Material restante no fundo	742,5	750,5	741,1	740,5	4,6
				Massa total da amostra (g)	594,7

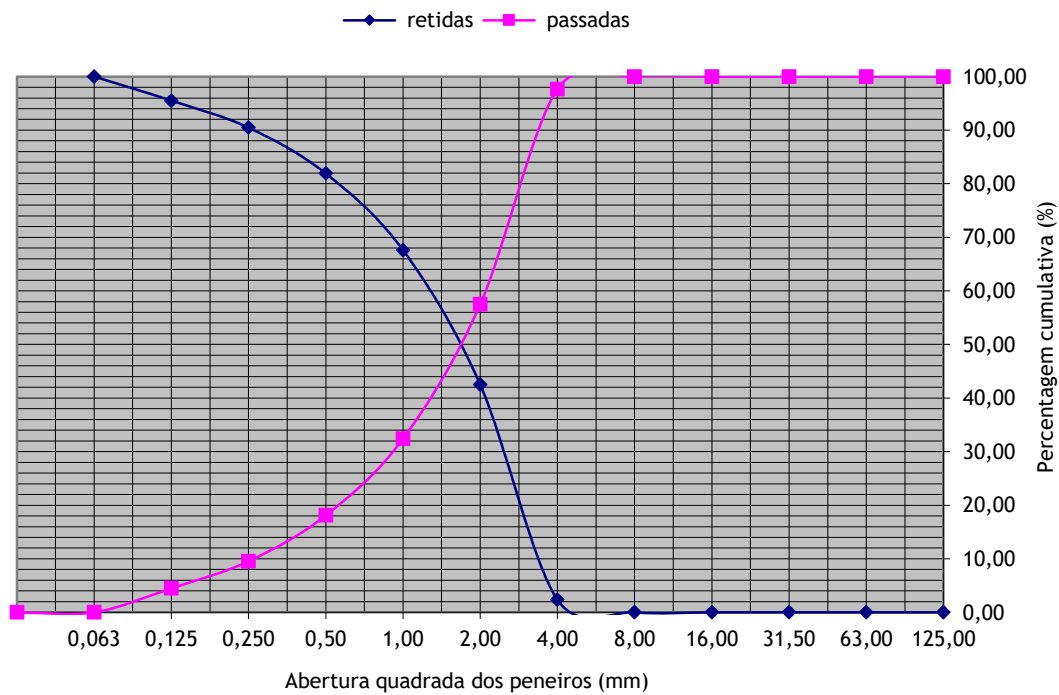
Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Material retido		Percentagens acumuladas	
	(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
4,00	3,20	0,54	99,46	0,54
2,00	137,50	23,12	76,34	23,66
1,00	157,70	26,52	49,82	50,18
0,50	136,70	22,99	26,84	73,16
0,250	97,00	16,31	10,53	89,47
0,125	48,40	8,14	2,39	97,61
0,063	9,60	1,61	0,77	99,23
Material restante no fundo	4,60	0,77	0,00	100,00
Total	594,70	100,00		



Anexo II - Granulometria do agregado moído de vidro

Amostra inicial (gramas):	601,1	Nº de fracções: 3	Observações: Areia natural		
Malha (mm)	Massa do Peneiro (g)	Fracção 1 Peneiro + Inerte (g)	Fracção 2 Peneiro + Inerte (g)	Fracção 3 Peneiro + Inerte (g)	Total das Fracções Massa do Inerte (g)
4,00	1002,6	1008,3	1007,6	1005,8	13,9
2,00	992,6	1068,8	1086,3	1060,6	237,9
1,00	921,8	970,0	974,3	969,7	148,6
0,50	820,1	847,3	847,1	850,6	84,7
0,250	780,7	798,7	793,4	800,7	50,7
0,125	743,3	754,5	749,2	756,1	29,9
0,063	760,1	770,9	763,0	773,0	26,6
Material restante no fundo	742,5	741,6	741,2	741,7	0,0
				Massa total da amostra (g)	592,3

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Material retido		Percentagens acumuladas	
	(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
4,00	13,90	2,35	97,65	2,35
2,00	237,90	40,17	57,49	42,51
1,00	148,60	25,09	32,40	67,60
0,50	84,70	14,30	18,10	81,90
0,250	50,70	8,56	9,54	90,46
0,125	29,90	5,05	4,49	95,51
0,063	26,60	4,49	0,00	100,00
Material restante no fundo	0,00	0,00	0,00	100,00
Total	592,20	100,00		

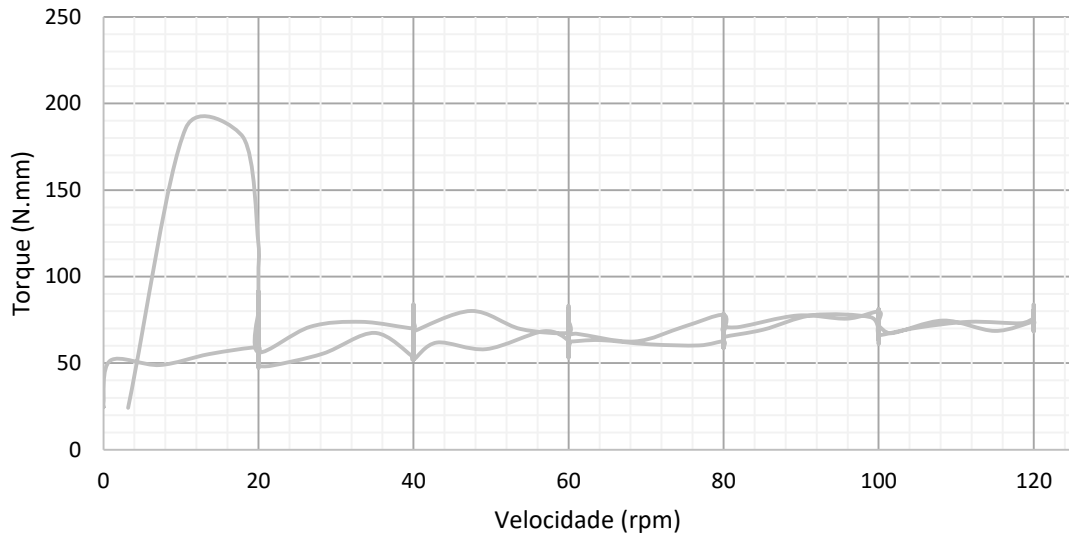


Anexo III - Massa volúmica aparente

	% de Vidro			
	0% de vidro (referência)	50% de vidro	75% de vidro	100% de vidro
Massa (kg)	2,609	2,4901	2,4426	2,4114
Volume (m3)	0,001			
Massa Volúmica (kg/m3)	2609	2490,1	2442,6	2411,4

Anexo IV - Reologia: Argamassa com 0% de vidro (referência)

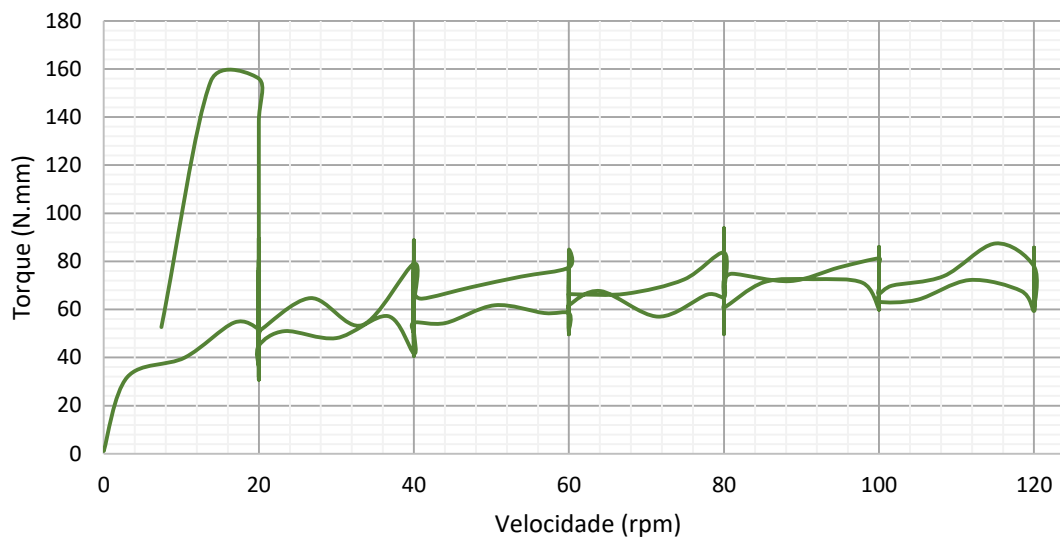
Curva de cedência Torque x Velocidade



v (rpm)	T (N.mm)	Desv. Pad.	CV (%)
120	73,82	3,37	4,56
100	69,65	3,07	4,41
80	64,65	2,91	4,50
60	61,14	3,38	5,52
40	57,83	4,02	6,95
20	56,02	5,14	9,18

Anexo V - Reologia: Argamassa com 50% de vidro

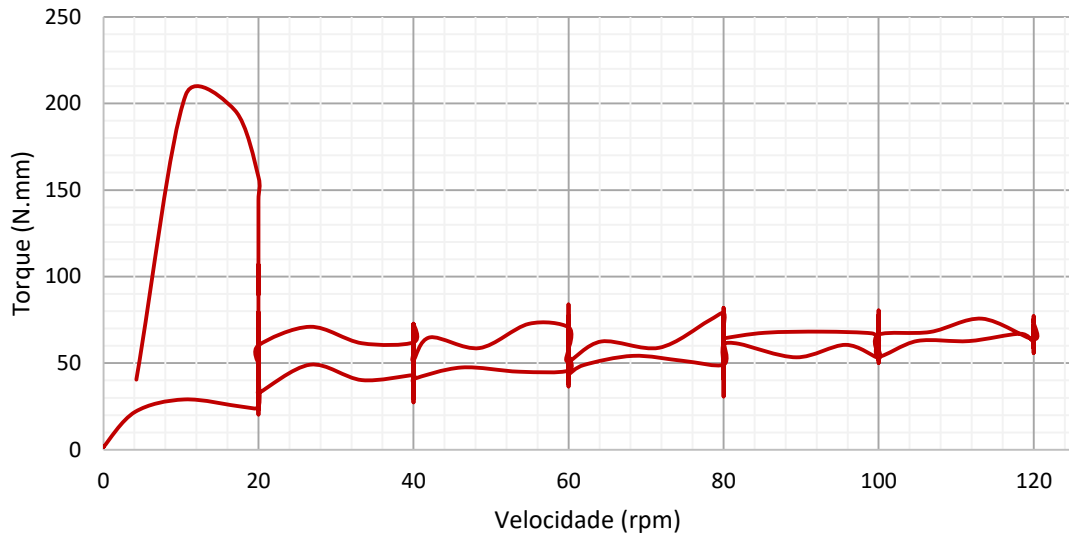
Curva de cedência Torque x Velocidade



v (rpm)	T (N.mm)	Desv. Pad.	CV (%)
120	73,94	5,44	7,35
100	67,29	4,92	7,31
80	64,31	5,31	8,25
60	58,69	5,62	9,57
40	54,38	5,74	10,55
20	49,07	6,32	12,88

Anexo VI - Reologia: Argamassa com 75% de vidro

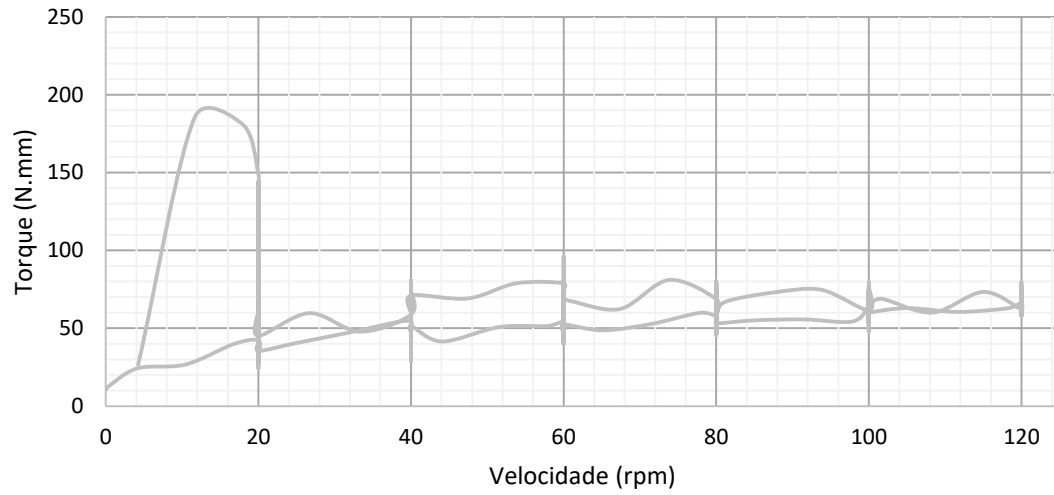
Curva de cedência Torque x Velocidade



v (rpm)	T (N.mm)	Desv. Pad.	CV (%)
120	65,61	4,26	6,49
100	58,50	4,29	7,33
80	52,93	5,42	10,24
60	47,39	5,02	10,60
40	41,78	5,61	13,42
20	33,47	6,37	19,03

Anexo VII - Reologia: Argamassa com 100% de vidro

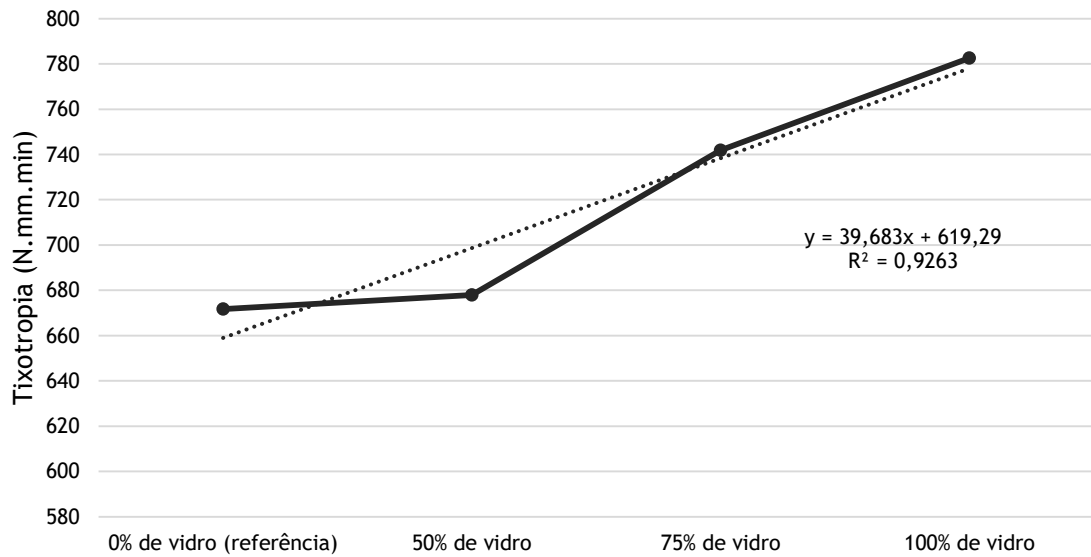
Curva de cedência Torque x Velocidade



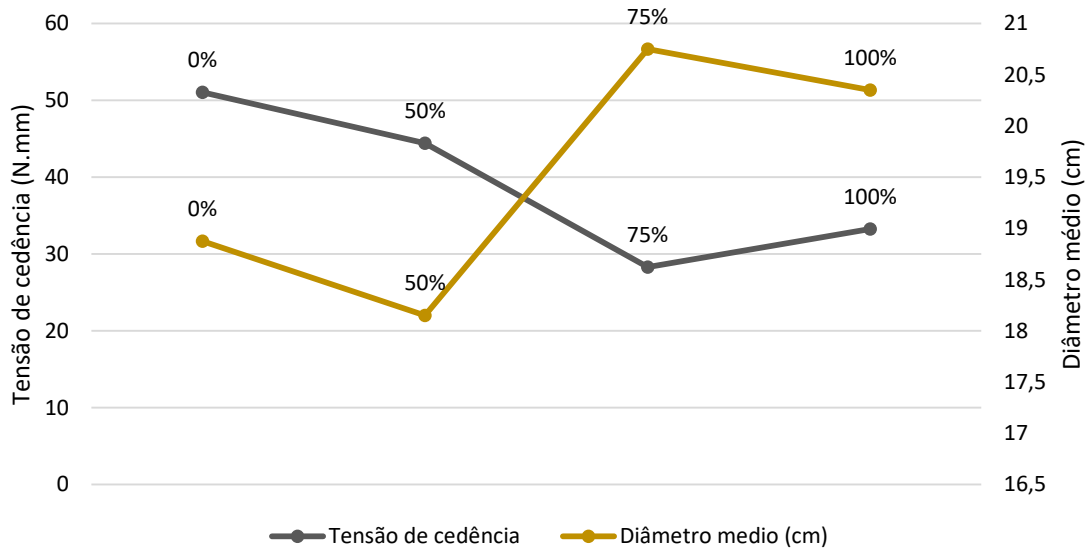
v (rpm)	T (N.mm)	Desv. Pad.	CV (%)
120	65,12	5,00	7,67
100	58,47	3,92	6,71
80	53,65	3,97	7,40
60	49,72	4,56	9,18
40	45,29	5,69	12,56
20	37,17	5,25	14,12

Anexo VIII - Reologia: Análise geral

Áreas de Histerese



Tensão de cedência vs Diâmetro de espalhamento



Anexo IX - Ensaio de Ultrassons e cálculo do módulo de elasticidade dinâmico

Dimensões	Comprimento	Massa	Tempo de propagação	Velocidade	Massa Volúmic a	Coefficiente de Poisson	Ed	Média	Desv. Pad.
17,82x4,1x4,03	17,82	593,80	51,90	3,43	1951,49	0,20	20705,7	20054,4	1362,10
17,78x4,11x3,8	17,78	566,60	54,80	3,24			18488,9		
17,76x4,11x4,0	17,76	580,30	51,40	3,46			20968,5		
18x4,16x3,98	18,00	591,90	54,50	3,30	1905,70		18708,9	20864,0	2192,85
18x4,1x3,99	18,00	580,50	51,70	3,48			20790,3		
18,2x4,04x3,95	18,20	575,80	49,60	3,67			23092,7		
18,2x4,14x3,98	18,20	579,10	52,50	3,47	1885,16		20389,9	20504,3	182,79
18,1x4,1x3,95	18,10	579,50	51,80	3,49			20715,1		
18x4,14x3,9	18,00	567,80	51,90	3,47			20408,0		
18,1x4,04x3,97	18,10	541,00	54,10	3,35	1818,75		18322,2	18954,6	578,13
18,2x4,1x3,98	18,20	543,30	53,30	3,41			19085,5		
18,1x4,02x3,98	18,10	545,30	52,50	3,45			19456,0		

Anexo X - Ensaio de resistência mecânica à flexão

% de Vidro	Resistência à flexão (MPa)			Média	Desv. Pad.
0% de vidro (referência)	3,95	3,58	3,30	3,61	0,326
50% de vidro	3,49	3,60	3,77	3,62	0,140
75% de vidro	5,60	5,30	5,30	5,40	0,173
100% de vidro	3,98	4,57	5,60	4,72	0,820

Anexo XI - Ensaio de resistência mecânica à flexão

% de Vidro	Resistência à compressão (MPa)						Média	Desv. Pad
0% de vidro (referência)	32,6	28,9	27,5	27,0	30,6	32,0	29,77	2,33
50% de vidro	26,7	27,0	28,4	30,3	24,9	32,1	28,23	2,62
75% de vidro	32,3	28,5	26,6	24,0	25,1	24,1	26,77	3,20
100% de vidro	30,7	28,8	26,2	24,2	26,1	28,8	27,47	2,37

Anexo XII - Ensaio de absorção de água por capilaridade: Argamassa com 0% de vidro (referência)

Tempo (mins)	Massa (g)				Média	Coef.	Tempo (mins ^{0,5})	Massa absorvida				Área de contacto	Absorção de água				Média
	1	2	3	4				1	2	3	4		1	2	3	4	
0	279,4	284,6	280,2	292,4	284,15	0,313	0,00	0	0	0	0	0,0016	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	281,3	286,5	282,3	294,2	286,075		2,24	1,9	1,9	2,1	1,8		1,19	1,19	1,31	1,13	1,20
10	282,1	287,5	283	294,7	286,825		3,16	2,7	2,9	2,8	2,3		1,69	1,81	1,75	1,44	1,67
15	282,4	287,7	283,4	295,2	287,175		3,87	3	3,1	3,2	2,8		1,88	1,94	2,00	1,75	1,89
30	283,6	288,6	284,2	295,8	288,05		5,48	4,2	4	4	3,4		2,63	2,50	2,50	2,13	2,44
45	283,6	289,1	284,7	296,4	288,45		6,71	4,2	4,5	4,5	4		2,63	2,81	2,81	2,50	2,69
60	284,2	289,6	285,6	296,8	289,05		7,75	4,8	5	5,4	4,4		3,00	3,13	3,38	2,75	3,06
75	284,7	290,1	285,9	297,4	289,525		8,66	5,3	5,5	5,7	5		3,31	3,44	3,56	3,13	3,36
90	285,1	290,6	286,3	297,8	289,95		9,49	5,7	6	6,1	5,4		3,56	3,75	3,81	3,38	3,63
	Coef.																
	0,3	0,31	0,33	0,31													
Média	0,313																
Desv. Pad.	0,013																

Anexo XIII - Ensaio de absorção de água por capilaridade: Argamassa com 50% de vidro

Tempo (mins)	Massa (g)				Média	Coef.	Tempo (mins ^{0,5})	Massa absorvida				Área de contacto	Absorção de água				Média
	1	2	3	4				1	2	3	4		1	2	3	4	
0	272,4	270,1	269,6	265,2	269,325	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0016	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	274,9	272,6	271,7	268,5	271,925		2,24	2,50	2,50	2,10	3,30		1,56	1,56	1,31	2,06	1,63
10	275,3	273,2	272,2	269,1	272,45		3,16	2,90	3,10	2,60	3,90		1,81	1,94	1,62	2,44	1,95
15	275,9	273,6	272,8	269,6	272,975		3,87	3,50	3,50	3,20	4,40		2,19	2,19	2,00	2,75	2,28
30	276,5	274,3	273,4	270,4	273,65		5,48	4,10	4,20	3,80	5,20		2,56	2,62	2,37	3,25	2,70
45	277,3	274,9	274,1	271,1	274,35		6,71	4,90	4,80	4,50	5,90		3,06	3,00	2,81	3,69	3,14
60	277,9	275,4	274,5	271,4	274,8		7,75	5,50	5,30	4,90	6,20		3,44	3,31	3,06	3,87	3,42
75	278,3	275,8	275	272,1	275,3		8,66	5,90	5,70	5,40	6,90		3,69	3,56	3,37	4,31	3,73
90	278,3	276,3	275,3	272,6	275,625		9,49	5,90	6,20	5,70	7,40		3,69	3,87	3,56	4,63	3,94
	Coef.																
	0,30	0,31	0,31	0,35													
Média	0,32																
Desv. Pad.	0,02																

Anexo XIV - Ensaio de absorção de água por capilaridade: Argamassa com 75% de vidro

Tempo (mins)	Massa (g)						Média	Coef.	Tempo (mins ^{0,5})	Massa absorvida						Área de contacto	Absorção de água				Média						
	1	2	3	4	5	6				1	2	3	4	5	6		1	2	3	4							
0	230,7	266,3	270,8	239,4	276,9	241,9	254,33	0,58	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
5	234,1	269,9	274,4	242,9	280,9	245,6	257,97		2,24	3,4	3,6	3,6	3,5	4,0	3,7												
10	235,6	271,1	275,8	244,9	281,9	246,5	259,30		3,16	4,9	4,8	5,0	5,5	5,0	4,6												
15	236,2	272,0	276,5	245,8	283,0	247,5	260,17		3,87	5,5	5,7	5,7	6,4	6,1	5,6												
30	237,6	273,2	278,3	247,0	284,3	249,3	261,62		5,48	6,9	6,9	7,5	7,6	7,4	7,4												
45	238,6	274,5	279,6	248,1	285,6	250,3	262,78		6,71	7,9	8,2	8,8	8,7	8,7	8,4												
60	239,6	275,2	280,6	249,0	286,6	250,9	263,65		7,75	8,9	8,9	9,8	9,6	9,7	9,0												
75	240,0	276,1	281,7	249,6	287,3	251,8	264,42		8,66	9,3	9,8	10,9	10,2	10,4	9,9												
90	241,0	276,7	282,4	250,2	287,9	252,5	265,12		9,49	10,3	10,4	11,6	10,8	11,0	10,6												
	Coef.																										
	0,54	0,56	0,66	0,53	0,60	0,60																					
Média	0,58																										
Desv. Pad.	0,05																										

Anexo XV - Ensaio de absorção de água por capilaridade: Argamassa com 100% de vidro

Tempo (mins)	Massa (g)						Média	Coef.	Tempo (mins ^{0,5})	Massa absorvida						Área de contacto	Absorção de água				Média
	1	2	3	4	5	6				1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	
0	257,7	241,8	252,4	262,4	240,1	244,6	249,83	0,523	0,00	0	0	0	0	0	0	0,0016	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	259,7	244,1	255	264,7	242,8	247,5	252,30		2,24	2	2,3	2,6	2,3	2,7	2,9		1,25	1,44	1,63	1,44	1,44
10	260,7	245,1	255,9	265,4	243,7	247,9	253,12		3,16	3	3,3	3,5	3	3,6	3,3		1,88	2,06	2,19	1,88	2,00
15	261,1	245,8	256,5	266,2	244,5	248,7	253,80		3,87	3,4	4	4,1	3,8	4,4	4,1		2,13	2,50	2,56	2,38	2,39
30	262,2	247,1	257,6	267,6	245,8	250,1	255,07		5,48	4,5	5,3	5,2	5,2	5,7	5,5		2,81	3,31	3,25	3,25	3,16
45	263,3	248,1	258,7	268,6	246,8	250,9	256,07		6,71	5,6	6,3	6,3	6,2	6,7	6,3		3,50	3,94	3,94	3,88	3,81
60	263,8	248,8	259,8	269,5	247,7	251,8	256,90		7,75	6,1	7	7,4	7,1	7,6	7,2		3,81	4,38	4,63	4,44	4,31
75	264,4	249,6	260,4	270,2	248,5	252,5	257,60		8,66	6,7	7,8	8	7,8	8,4	7,9		4,19	4,87	5,00	4,88	4,73
90	265,1	250,6	261	271	249,3	253,1	258,35		9,49	7,4	8,8	8,6	8,6	9,2	8,5		4,63	5,50	5,38	5,38	5,22
	Coef.																				
	0,44	0,55	0,51	0,56	0,56	0,52															
Média	0,523																				
Desv. Pad.	0,046																				

Anexo XVI - Ensaio de massa volúmica no estado endurecido

Provete		Massa seca (g)	Massa húmida (g)	Massa imersa (g)	Massa Volúmica (kg/m ³)	Média	Desv. Pad.
0% de vidro (referência)	1	268	297,8	161	1959,06	1951,49	7,412537
	2	279	310,1	166,6	1944,25		
	3	271,6	301,8	162,6	1951,15		
50% de vidro	1	253,8	281,1	148,3	1911,14	1905,70	4,997558
	2	251,6	277,7	145,6	1904,62		
	3	258,2	285,2	149,4	1901,33		
75% de vidro	1	241,7	267,4	140,1	1898,66	1885,16 (1979,45)	19,103 (163,874)
	2	230,4	255,6	132,5	1871,65		
	3	238,7	247,5	137,4	2168,03		
100% de vidro	1	262,9	289,3	148,3	1864,54	1818,75	85,06395
	2	253,1	287,8	140,7	1720,60		
	3	258,4	284,1	146	1871,11		

Anexo XVII - Ensaio de absorção de água

Provete		Massa seca (g)	Massa húmida (g)	Absorção de água	Média	Desv. Pad.
0% de vidro (referência)	1	268	297,8	11,12	11,13	0,016
	2	279	310,1	11,15		
	3	271,6	301,8	11,12		
50% de vidro	1	253,8	281,1	10,76	10,53	0,201
	2	251,6	277,7	10,37		
	3	258,2	285,2	10,46		
75% de vidro	1	241,7	267,4	10,63	10,79 (8,42)	0,215 (4,101)
	2	230,4	255,6	10,94		
	3	238,7	247,5	3,69		
100% de vidro	1	262,9	289,3	10,04	11,23	2,146
	2	253,1	287,8	13,71		
	3	258,4	284,1	9,95		