



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

Comportamento Mecânico e Durabilidade de Betão com Agregados Reciclados de Resíduos de Vidro (Glasscrete)

Sara Daniela Esteves de Brito

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil: Estruturas e Construção
(Ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira

Covilhã, Outubro de 2016

À minha avó Céu

Agradecimentos

Ao Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira (orientador científico deste estudo), pela sua disponibilidade, dedicação, colaboração que sempre demonstrou ao longo da elaboração deste estudo, assim como todos os conhecimentos transmitidos.

À minha mãe pela oportunidade, pelos sacrifícios que fez ao longo do meu percurso académico, por acreditar em mim e me ajudar a ultrapassar os obstáculos, pela dedicação e pelo amor incondicional sempre demonstrados.

Às minhas irmãs pelo apoio e incentivo durante esta fase, pelo carinho e alegrias partilhadas em todos os momentos.

A toda a minha família, pelo apoio incondicional.

Aos meus colegas e amigos de curso que contribuíram para o meu percurso académico, pelo companheirismo e motivação, por tornarem esta jornada mais divertida e feliz.

Ao Tomás pela colaboração na elaboração dos ensaios presentes neste estudo, assim como o companheirismo e apoio demonstrados ao longo deste percurso académico.

Aos técnicos do departamento de Engenharia Civil da Universidade da Beira interior, Sr. Felix por toda a ajuda prestada durante os ensaios laboratoriais.

Agradeço também a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação

Resumo

A sustentabilidade ambiental é cada vez mais um tema discutido, a preocupação com o meio ambiente é crescente. Como reduzir o uso de matérias-primas e o que fazer com os resíduos provenientes da atividade humana? São questões que têm sido exploradas ao longo dos tempos.

O setor da construção civil tem-se focado na inserção de resíduos sólidos para a produção de betões, travando assim o crescente depósito de materiais em aterro. Esta prática amiga do ambiente dá nova vida a materiais como o vidro, cerâmicas e até mesmo resíduos provenientes de demolições.

A durabilidade das estruturas é também uma preocupação, associada à precoce degradação observadas nas estruturas. Nos últimos anos a Construção Civil tem se voltado para a extensão da vida útil das estruturas de betão, assim como medidas que permitam aumentar a durabilidade das mesmas.

Assim, este estudo debruçou-se sobre o comportamento mecânico e a durabilidade de betão contendo agregados reciclados de resíduos de vidro. Onde foram substituídos tanto agregados grossos como agregados finos. Deste modo, foram produzidos cinco tipos diferentes de betão, um betão de referência e os restantes com substituição de agregados finos e grossos, formando combinações: 50-50%, 50-100%, 100-50%, 100-100%.

Os resultados obtidos apresentam apenas pequenas discrepâncias, concluindo-se que é viável tecnicamente, o uso de agregados reciclados no betão de forma racional e em atenção as propriedades desejadas.

Palavras-chave

Durabilidade; Propriedades do Betão Endurecido; Propriedades do Betão Fresco; Agregados de Resíduo de Vidro

Abstract

Environmental sustainability is increasingly a subject discussed, the concern with the environment is increasing. How to reduce the use of raw materials and what to do with the wastes from human activity? These matters have been explored throughout the ages.

The construction sector has focused on inserting solid wastes for the production of concrete, stopping the increase of materials in landfill. This environmentally friendly practice gives new life to materials such as glass, ceramics and even waste from demolition.

The durability of structures is also a concern, associated with the degradation observed in early structures. In recent years, Construction has been returned to the extension of the useful life of concrete structures, as well as measures to increase the durability of the same.

Therefore, this study has on the mechanical behavior and durability of concrete containing recycled aggregates of glass waste. Where were replaced both aggregated as thick as thin aggregates. In this way, were produced five different types of concrete, a reference concrete and the others with thick and thin aggregates replacement, forming combinations: 50-50%, 50-100%, 100-50%, 100-100%.

The results obtained show only minor discrepancies, concluding that it is technically reliable, the use of recycled aggregates in concrete in a rational way and note the desired properties.

Keywords

Durability, Properties of Hardened Concrete, Properties of Fresh Concrete, Glass Waste Aggregates.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Palavras-chave	vii
Abstract	ix
Keywords	ix
Índice	xi
Índice de Figuras	xiii
Índice de tabelas	xv
Lista de Acrónimos	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objetivos e justificação do tema	3
1.3. Organização da dissertação	4
2. Vidro como material	5
2.1. Reciclagem de vidro em Portugal	7
2.2. Betão com agregados de vidro	9
2.3. Características do betão com agregados de vidro	10
2.3.1. Trabalhabilidade	10
2.3.2. Propriedades mecânicas	11
2.3.2.1. Resistência à compressão	11
2.3.2.2. Resistência à tração	13
2.3.3. Propriedades de Durabilidade	14
2.3.3.1. Absorção de água por capilaridade	14
2.4. Reações álcalis-agregado	15
2.4.1. Reações álcalis-sílica	16
2.4.2. Medidas mitigadoras das Reações Álcalis-Sílica	19
2.4.2.1. Cinzas volantes	20
2.4.2.2. Metacaulino	23
2.4.2.3. Pó de vidro	24
3. Procedimento experimental	25
3.1. Introdução	25
3.2. Materiais	26
3.2.1. Cimento	26
3.2.2. Agregados	26
3.2.2.1. Agregados naturais	26
3.2.2.2. Agregado de vidro	27
3.2.3. Água de amassadura	28

3.2.4.	Adições	28
3.2.5.	Adjuvante	28
3.3.	Caracterização dos materiais	29
3.3.1.	Análise granulométrica	29
3.3.2.	Composição do betão	33
3.4.	Procedimento de mistura	35
3.5.	Ensaio do betão no estado fresco	36
3.5.1.	Ensaio do abaixamento do tronco de cone (slump test).....	36
3.5.2.	Ensaio da mesa de espalhamento (mesa de Graff)	37
3.5.3.	Medição da massa volúmica	38
3.6.	Ensaio do betão no estado endurecido	39
3.6.1.	Medição da massa volúmica	39
3.6.2.	Determinação da velocidade ultrassónica e do modulo de elasticidade dinâmico	40
3.6.3.	Ensaio de resistência à compressão	40
3.6.4.	Absorção por capilaridade	42
4.	Apresentação e discussão dos resultados.....	43
4.1.	Ensaio do betão fresco	43
4.1.1.	Consistência do betão pelo abaixamento do tronco de cone	43
4.1.2.	Ensaio da mesa de espalhamento	44
4.1.3.	Determinação da massa volúmica	46
4.2.	Ensaio do betão endurecido	47
4.2.1.	Determinação da massa volúmica	47
4.2.2.	Ensaio de ultrassom	49
4.2.3.	Ensaio de compressão	51
4.2.4.	Absorção de água por capilaridade.....	52
5.	Conclusões	55
6.	Referências Bibliográficas.....	57
7.	Anexos	61

Índice de Figuras

Figura 2.1. Composição do vidro comum segundo PRS.....	7
Figura 3.1. Pedrisco e brita utilizados no estudo	26
Figura 3.2. Britador de mandíbulas.....	27
Figura 3.3. Vidro após ser reduzido a partículas	27
Figura 3.4. Estufa e peneiro utilizados neste estudo.....	29
Figura 3.5. Curva granulométrica característica da brita de vidro	30
Figura 3.6. Curva granulométrica característica da areia de vidro	31
Figura 3.7. Aspecto do betão após mistura	35
Figura 3.8. Procedimento do ensaio do tronco de cone	36
Figura 3.9. Mesa de espalhamento	37
Figura 3.10. Betão nos moldes por compactar e compactado	39
Figura 3.11. Corpo de prova em perspectiva	40
Figura 3.12. Vista em planta das direções das medições.....	40
Figura 3.13. Prensa utilizada para os ensaios de compressão	41
Figura 3.14. Rotura do tipo normal.....	41
Figura 3.15. Corpos de prova durante o ensaio de capilaridade	42
Figura 3.16. Pesagem dos corpos de prova.....	42
Figura 4.1. Consistência pelo método do abaixamento do tronco de cone	43
Figura 4.2. Abaixamento do tronco de cone para o betão de referência e para as misturas com agregados de vidro	44
Figura 4.3. Obtenção do valor do diâmetro do teste da mesa de espalhamento.....	44
Figura 4.4. Consistência pelo método da mesa de espalhamento	45
Figura 4.5. Massa volúmica média do betão fresco.....	46
Figura 4.6. Tipos de misturas.....	47
Figura 4.7. Massa volúmica média do betão endurecido	47
Figura 4.8. Velocidade média	49
Figura 4.9. Módulo de elasticidade dinâmico	50
Figura 4.10. Resistência média à compressão dos diferentes tipos de misturas.	51
Figura 4.11. Absorção de água por capilaridade	52
Figura 4.12. Coeficiente de capilaridade.....	53

Índice de Tabelas

Tabela 2.1. Fases da sílica nos vários tipos de agregado	16
Tabela 3.1. Granulometria característica do agregado de brita de resíduo de vidro.....	32
Tabela 3.2. Granulometria característica do agregado da areia de resíduo de vidro	32
Tabela 3.3. Teores de granulometria para cada tipo de agregado.....	33
Tabela 3.4. Traço, em massa (kg), da mistura do betão de referência.....	33
Tabela 3.5. Tipo de misturas com as devidas quantidades e substituições	34
Tabela 4.1. Qualidade do betão em função da velocidade de propagação dos ultra-sons. Fonte: Whitehurst (1966) e Rincon et al (1998)	49
Tabela 4.2. Velocidade de propagação de ultra-som do estudo de Mardani-Aghabaglou et al. (2014).	50

Lista de Acrónimos

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ASTM	American Society for Testing and Materials
NP	Norma Portuguesa
PRS	Portal dos Resíduos Sólidos
RAA	Reações Álcalis-Agregado
RAS	Reações Álcalis-Sílica
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RU	Resíduos Urbanos

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

O Homem tem se desenvolvido ao longo do tempo, adaptando-se ao meio que o rodeia aproveitando aquilo que o mesmo lhe dá. No início da sua sedentarização o Homem começou por construir abrigo para se proteger dos predadores e do frio. No entanto à medida que o Homem evoluía as suas necessidades também cresceram. As construções simples usadas para abrigo passaram a providenciar proteção, conforto e lazer.

Com a crescente evolução do Homem cresceu também a necessidade de consumo de matérias primas e consequente produção de resíduos de modo a satisfazer as suas necessidades. Hoje em dia, os produtos resultantes das suas atividades tanto social como industrial são imensos, desde embalagens de vidro, plástico, papel, etc. Os denominados de resíduos têm aumentado com o avanço da atividade industrial e com a melhoria das condições de vida, provenientes tanto da construção como do uso doméstico de produtos, resultado das atividades diárias, quer pela utilização inadequada dos materiais. Surge assim a necessidade reaproveitar ao máximo os bens de forma a criar uma sustentabilidade ambiental, seja reutilizando ou reciclando.

Um relatório do Banco Mundial (What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management), afirma que no mundo são produzidos 1.3 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano, e que em 2025 este valor atingirá os 2.2 bilhões de toneladas.

De acordo com a APA (Agencia Portuguesa do Ambiente), em Portugal cada habitante produz, em média, 1.2 Kg de resíduos por dia, o que corresponde a uma produção média anual de 452 Kg. Em 2008 a produção de resíduos sólidos urbanos ultrapassou 5 milhões de toneladas das quais 6% era constituído de vidro. Em 2014 a produção de RU foi cerca de 4.719 mil toneladas. (APA, 2014)

A excessiva produção de resíduos urbanos e o crescente aumento de depósitos em aterros, a falta de tratamento e a eliminação levanta um grande problema. É necessário consciencializar a população sobre a crescente utilização dos recursos e matérias-primas que colocam em causa a sustentabilidade dos ecossistemas. A aplicação de medidas como reduzir a produção destes resíduos, reutilizar e reciclar é fundamental para a proteção e conservação do meio ambiente. Por vezes o tratamento e eliminação dos resíduos podem-se revelar um verdadeiro problema.

O PERSU 2020 (Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos) de modo a combater o depósito de resíduos urbanos estabeleceram metas para 2020 como preparação para a reutilização e reciclagem mínima de 50% dos RU, valorização de resíduos de embalagens. Incentivando a reciclagem e/ou a reutilização dos mesmos, passando por reduzir a produção de RU, aumentar e melhorar a rede de recolha seletiva, eliminar progressivamente a deposição direta de RU em aterro, são apenas alguns eixos de atuação.

O vidro como recipiente de vários tipos de consumíveis, em princípio, é 100% reciclável. A sua inserção na produção de novas embalagens de vidros é perfeitamente possível e é utilizada na indústria vidreira. Porém, a indústria vidreira se interessa em boa parte pelo resíduo de vidro homogêneo em termos de cores. Também se interessa pelos resíduos disponíveis nas suas proximidades tornando assim a reciclagem um benefício económico. A questão coloca-se quando a coleta do resíduo é heterogênea, aglomerando todas as cores possíveis, e também quando essa coleta é relativamente distante das regiões industriais. Essas situações desestimulam a reciclagem do vidro enquanto matéria-prima da indústria vidreira, heterogeneidade de cores e preço de transporte.

Na construção civil o betão desempenha um grande papel devido a sua versatilidade e adaptabilidade, o seu custo é relativamente reduzido e o seu uso tem vindo a crescer em todos os tipos de obras, entre pontes, barragens, tuneis, residências, etc. As suas propriedades como a durabilidade, a disponibilidade dos seus materiais, e a possibilidade de incorporar materiais resultantes da indústria, reutilizando-os, são algumas das inúmeras vantagens.

Na tentativa de contribuir para o uso local do vidro na indústria de construção, como componentes em compósitos cimentícios, esta dissertação apresenta um estudo de carácter experimental com o intuito de observar os efeitos e os limites da substituição do vidro tanto como agregados finos e grossos nas propriedades do betão.

1.2. Objetivos e justificação do tema

A crescente utilização de matérias-primas e a crescente produção de resíduos urbanos é um problema atual. Neste contexto surge o interesse em estudar a inserção de vidro como agregado na fabricação de betão, sobretudo os provenientes da reciclagem de resíduos urbanos e industriais como material alternativo.

O presente estudo tem como objectivo analisar e avaliar o comportamento dos betões produzidos com agregados produzidos a partir de resíduo de vidro. O estudo é parte de um trabalho iniciado nos Laboratórios de Construção em atenção à uma linha de investigação desenvolvida no seio do C-MADE, a qual visa a valorização e resíduos urbanos e industriais como materiais de construção. Em caráter complementar aos estudos precedentes desenvolvidos em forma de argamassas, este se ocupa de betões normais nos quais os agregados finos e grossos convencionais são substituídos por resíduos de vidro. Desta maneira o principal objetivo é o de conhecer a influência dos agregados de vidro nas propriedades do betão nos estados fresco e endurecido. Finalmente pode-se argumentar que as informações obtidas são importantes no sentido de viabilizar o incremento da reciclagem do vidro e de contribuir para a sustentabilidade da construção.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos elaborados da seguinte forma:

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

Assim o segundo capítulo dedica-se a um levantamento do estado de arte, apresentando as propriedades do vidro, assim como a sua história, as características do betão com agregados de vidro.

O terceiro capítulo descreve o programa experimental desenvolvido, nomeadamente ao nível dos ensaios realizados para observação das propriedades do betão no estado fresco e no estado endurecido.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados obtidos durante o estudo experimental, tentando extrair conclusões, aferindo a variação de desempenho dos betões com o aumento da incorporação dos agregados de vidro reciclados.

No capítulo cinco apresentam-se as principais conclusões extraídas do estudo realizado.

O documento contém ainda um índice geral, uma listagem de figuras, tabelas e uma listagem de referências bibliográficas.

2. Vidro como material

Julga-se que o vidro já era conhecido há pelo menos 5.000 anos antes de Cristo, e que fora descoberto de forma casual, através das fogueiras feitas na praia, pelos fenícios, sírios e babilônios. No entanto já na Idade da Pedra Polida (10.000 a 5.000 a.C.) eram queimadas peças cerâmicas com o intuito de aumentar a resistência mecânica do material. As peças de vidro mais antigas confeccionadas pelo Homem datam de 7.000 a.C., na Mesopotâmia, afirma Smith (1964) citado por Barros (2010).

A partir de 1.500 a.C. no Egito o vidro deixou de ser usado como adorno e iniciou-se a produção de recipientes. Por volta de 300 a.C. foi descoberto o sopro, que consistia em colher uma porção pequena do material em fusão e com a ponta de um tubo soprar, a partir daí ficou mais fácil a produção de recipientes e frascos. Hoje em dia, 2000 anos depois ainda se utiliza este princípio.

Em Portugal a indústria do vidro surge no século XV, com uma pequena fábrica na freguesia S. Pedro de Villa Chã, protegida pelo rei D. João II.

A American Society for Testing and Materials (ASTM) define o vidro como um material inorgânico, homogêneo e amorfo, composto basicamente por sílica ou dióxido de silício (SiO_2), carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de sódio (Na_2CO_3). A inclusão destes dois aditivos reduz a temperatura de fusão da areia, diminuindo a quantidade energia consumida processo.

A produção do vidro resulta da fusão das matérias-primas: areia, barrilha e calcário, por vezes são utilizados grandes parte de cacos de vidro reciclados, de modo a reduzir o uso de matérias-primas, minimizando a energia necessária para a produção da mesma quantidade de vidro.

A temperatura necessária para a fusão do vidro está entre os 1000°C e os 1200°C , já a temperatura necessária para fundir a areia ronda os 1700°C , sendo um processo vantajoso para o ambiente e para a economia.

A sua estrutura molecular amorfa permite-lhe reciclar infinitas vezes sem que se perca a qualidade, tornando-o assim o único produto 100% reciclável. Para além de ser um produto cujo tempo de vida é indeterminável, possui outras características como:

- Transmissão de luz
- Recurso abundante
- Baixo nível de condutividade
- Isolante térmico
- Impermeável
- Dureza
- Não poluente
- Baixa densidade
- Resistência ao fogo
- Durabilidade

As suas propriedades mecânicas são bastante apreciadas neste material, possui uma resistência á compressão cerca de 1000 MPa, uma resistência à tração entre 300 a 700 MPa enquanto que a resistência à flexão ronda os 40 MPa, afirma Barros (2010).

A sua composição varia de acordo com a sua finalidade, pequenas alterações podem proporcionar específicas propriedades, como por exemplo a cor, no entanto, a sua natureza química e mineralógica obriga ao estudo do comportamento relativamente à reação álcalis-sílica (RAS).

Segundo Shi e Zheng (2007), o vidro pode ser classificado em diferentes categorias devido a sua composição, deste modo temos: sílica vítrea (usados em laboratórios de alta tecnologia), vidros sodo-cálcios (usados na fabricação de recipientes, lâmpadas, vidro plano), vidros de borossilicato (usado em utensílios domésticos, lâmpadas e vidros resistentes ao fogo), vidros de chumbo (usados como protetores de radiação), silicatos alcalinos, vidros de bário e vidros de silicato de alumínio.

O vidro mais comercializado é vidro sodo-cálcio, devido ao seu elevado consumo populacional em artigos como garrafas, copos, recipientes, etc., cuja composição química é 73% SiO₂, 13% Na₂O e 10% CaO podendo ainda conter aditivos como sulfato de ferro, ou oxido de cromo, selênio, oxido de cobre, entre outros, usados para atribuir coloração desejada.

2.1. Reciclagem de vidro em Portugal

Segundo a APA desde 2004 até 2010 a produção de resíduos de embalagens aumentou cerca de 20%, enquanto que a produção de resíduos de vidro aumentou cerca de 16%. Em 2010 foram produzidas cerca de 425.033 toneladas de resíduos de vidro, correspondendo a 25 % do total de resíduos urbanos. Dessas 425 toneladas apenas 53% foi reciclado, a taxa de reciclagem dos resíduos de vidro aumentou cerca de 14% entre 2004 e 2010.

A produção do vidro acarreta um acréscimo no consumo energético, já que o vidro é produzido a altas temperaturas, sem esquecer que necessita de grandes quantidades de matéria prima, a reciclagem de vidro além de diminuir o consumo de energia, diminui o consumo de matéria prima, assim como os gases emitidos, tornando o processo de produção de vidro mais econômico e sustentável. Segundo o PRS (Portal dos Resíduos Sólidos) a reciclagem de vidro reduz até 300kg de gás carbônico (CO₂) por tonelada de vidro reciclado.

Segundo Alves *et al.* (2001) a produção de 1 kg de vidro novo necessita 4500 quilojoules, enquanto que para produzir 1 kg de vidro reciclado são necessários apenas 500 quilojoules!

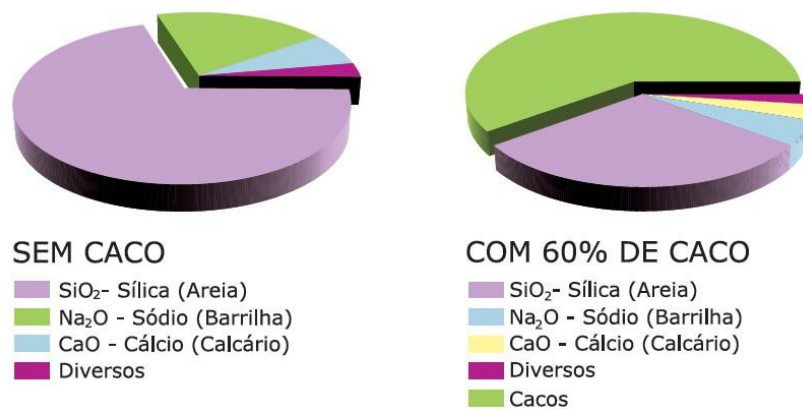


Figura 2.1. Composição do vidro comum segundo PRS
(<http://www.portalresiduossolidos.com/wp-content/uploads/2013/09/GBM-024-2014.04.10-20.20.jpg>)

Ainda assim, a indústria vidreira aparenta não demonstrar muito interesse na recolha destes resíduos para reciclagem, talvez por falta de condições ou pelo facto de não se justificar o transporte de pequenas quantidades por longas distâncias, entre os pontos de recolha e a central de reciclagem, dispendendo imensa energia (combustível) e emitindo gases tornando-se economicamente inviável. Por sua vez a sua valorização na indústria de materiais de construção revela-se como uma alternativa ao depósito deste agregado em aterros, sobretudo na reciclagem de vidro para compósitos cimentícios como argamassas e betões, quer como agregado ou como adição.

O ciclo de vida do vidro não tem fim, este é um dos poucos materiais que pode ser reciclado infinitamente sem perder as suas propriedades, no entanto a heterogeneidade dos resíduos também limita a sua reciclagem, uma vez que é necessário separar o vidro por cores antes de se proceder à sua reciclagem, crescendo assim o depósito de resíduos de vidro em aterros.

Este material levantou a curiosidade de muitos estudiosos quanto à sua aplicação enquanto resíduo, de modo a minimizar os impactos ambientais provocados pelo seu depósito em aterro, Shi e Zheng (2007), estudaram o uso de vidro na produção de cimento e betão, Cota et al. (2015) estudaram a aplicação de vidro na produção de telhas, Disfani *et al.* (2012) estudou a inserção de resíduo de vidro na produção de estradas. Estes são apenas alguns exemplos de autores e de alguns dos seus estudos realizados de modo a avaliar a viabilidade da inserção deste material na produção de novos produtos, sejam eles cimento, betões, telhas, estradas etc.

O uso de vidro como substituto do agregado natural, reduz o uso de recursos naturais é uma alternativa com benefícios ambientais associados ao depósito em aterros de resíduos sólidos, quer às pedreiras, quer económicos. No entanto, a sua natureza química e mineralógica obriga ao estudo do comportamento do betão contendo este material como agregado, relativamente à reação álcalis-sílica (RAS).

Alguns estudos mostram que o vidro tem potencial em materiais cimentícios, Shi e Zheng (2007), afirmam que desde 1960 são realizados estudos de forma a inserir agregados de resíduo de vidro na produção de betão, mencionando autores como Pike *et al.* (1960) Schmidt e Saia (1963), Phillips *et al.* (1972) e Johnston (1974).

Segundo Shi e Zheng (2007) os benefícios económicos e ambientais da reutilização dos resíduos de vidro reciclados em betões e cimentos podem ser muito significativos, dependendo da utilização e da escala de produção. A utilização de resíduos de vidro na produção de betão reduz os custos de eliminação deste resíduo, conserva o meio ambiente economizando o uso de matérias-primas, energia e reduz a quantidade de CO₂, NO_x e outros poluentes emitido na fabricação do cimento.

Oliveira *et al* (2008) afirmam com base nos resultados do seu estudo que a areia produzida a partir de resíduos de vidro pode ser um bom substituto das areias naturais, promovendo assim benefícios económicos e ambientais consideráveis.

Taha e Nounu (2007) afirmam que como o vidro é material impermeável, a areia de vidro reciclado pode reduzir a permeabilidade da mistura de betão e pode aumentar a sua durabilidade e limitar a migração da água e iões no interior da matriz de concreto.

2.2. Betão com agregados de vidro

Durante os últimos anos têm-se utilizados vários materiais nas misturas de betão, de modo economizar, a inserção de vidro como substituto do agregado natural apresenta-se como uma opção viável e cativou vários curiosos ao seu estudo, de modo a compreender o comportamento do betão com a presença deste material, o desenvolvimento das suas propriedades e até mesmo formas de aperfeiçoar o betão.

Usado em forma de adição, como substituição de agregado natural como a areia, ou como substituto do cimento, são várias a empregabilidade de resíduos de vidro, assim como os estudos realizados de forma a analisar o comportamento deste material em misturas cimentícias.

Quando utilizado em pó fino, apresenta características pozolânicas, já a sua aplicação como agregado tem apresentado problemas devido ao surgimento da RAS afirma Serpa *et al.*^a (2012).

Serpa *et al* (2012)^b aconselha o uso de superplastificante quando se pretende aplicar agregado grosso e fino de vidro, de modo a manter a mesma trabalhabilidade para a mesma relação de água/cimento, não comprometendo o comportamento mecânico dos betões.

Alguns autores defendem o emprego deste resíduo na produção de cimento e/ou betão, referindo em seus estudos, que este traz benefícios económicos e ambientais:

Ganiron (2013) após a realização do seu estudo sobre o uso de garrafas de vidro reciclado como agregado fino em misturas de betão, conclui que o uso deste material diminui o custo da produção de betão, devido à grande disponibilidade de garrafas de vidro, assim como a unidade de peso, devido à baixa densidade do vidro. Embora não se recomende para a produção de elementos como colunas, vigas e lajes suspensas, apresenta-se como uma boa alternativa ao agregado fino.

Shayan e Xu (2004) afirmam que o vidro possui grande potencial como resíduo na produção de betões, seja na forma de agregado miúdo, graúdo ou moído, podendo assim, ser utilizado como substituto de materiais caros como cinzas volantes na medida que impediria as RAS ou como substituto do cimento.

2.3. Características do betão com agregados de vidro

2.3.1. Trabalhabilidade

Propriedade que confere ao betão fresco facilidade no seu manuseamento sem afetar a sua homogeneidade. O betão é considerado de boa trabalhabilidade, quando no estado fresco, apresenta consistência e as dimensões máximas dos agregados são apropriadas ao tipo de obra a que se destina. No entanto é também influenciada pelos métodos adotados para o transporte, características da peça, lançamento, e claro pelo o traço e as características do agregado.

Topçu e Canbaz (2004), Chen et al (2006) citados por Shi e Zheng (2007) afirmam que o uso de vidro como agregado não tem efeito significativo sobre a trabalhabilidade, no entanto a sua inserção diminui o conteúdo de ar e a unidade de peso no estado fresco.

Terro (2005) concluiu através do seu estudo que em geral os betões produzidos com 10% de agregado de vidro, sejam ele fino, grosso ou mistura de ambos melhora as propriedades no estado fresco e endurecido à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas do que aqueles com maiores percentagens de substituição.

Oliveira *et al* (2008) afirmam que a manutenção da consistência na classe S3, devido sobretudo o efeito da lamelaridade dos grãos de vidro, foi possível com a adição de um adjuvante altamente redutor de água de modo a manter constante a relação água/cimento.

Castro e Brito (2013), concluíram que a trabalhabilidade é afetada pelo tamanho das partículas, conduzindo um aumento na razão de a/c de 0.55 para 0.58 para a mistura com substituição de 20% de agregado fino de vidro. Já a densidade do betão diminui devido á menor densidade das partículas de vidro.

Ganiron (2013), afirma que o uso de garrafas de vidro reciclado como agregado fino na produção de betão, diminui a proporção de água/cimento, dependendo da quantidade presente na mistura.

2.3.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais definem o comportamento do material quando sujeito a cargas externas, ou seja, é a resposta do material perante uma força, sem se deformar ou fraturar. Essa força aplicada pode ser de compressão, tensão, flexão, torção, podendo ser aplicada ao longo do tempo, ou intervalada.

Para controle de qualidade e atendimento as especificações, são realizados ensaios em laboratório de forma a determinar as propriedades mecânicas do betão, sendo elas a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade.

Estudos feitos por Ali e Al-Tersawy (2012), Castro e Brito (2013), Sharifi *et al.* (2013) citados por Rashad (2014) relataram diminuição da resistência mecânica com aumento do teor de areia de vidro. Esta redução foi principalmente devido à superfície lisa e bordas nítidas de partículas de vidro que resultou na ligação mais fraca na zona de transição entre as partículas de vidro e matriz de pasta de cimento. Outros como estudos mostraram o contrário como é o caso de Metwally (2007), Turgut e Yahlizade (2009) que relataram uma melhoria das propriedades mecânicas de betões com resíduos de pó de vidro. No geral a utilização de resíduo de vidro como agregado fino em argamassas e betões apresenta vantagens como o aumento da trabalhabilidade, a redução de densidade, o aumento da resistência química, resistência ao fogo, por outro lado a resistência à compressão diminuiu, aumentou a expansão das RAS e propriedades como absorção de água, resistência à brasão ainda precisam de ser estudadas.

2.3.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão assim como as outras características desenvolvem-se ao longo do tempo. Para efeito de dimensionamento das estruturas, estabeleceu-se a idade de 28 dias como característica desta propriedade.

Segundo a norma NP EN 206-1, a resistência à compressão deve ser determinada em provetes cúbicos de 150 mm ou provetes cilíndricos de 150/300 mm, sendo a resistência cilíndrica da ordem de 0,80 da resistência cúbica, diferença essa, gerada pelo atrito entre as faces dos provetes e as prensas, que ao impedirem a deformação transversal do betão conduzem a maiores valores da resistência.

Park *et al.* (2004) demonstraram em seu estudo que a cor dos vidros reciclados que fazem parte do agregado de resíduo de vidro não tem qualquer influência sobre a resistência à compressão, e que

há medida que o teor de agregado de vidro aumenta na mistura a sua resistência diminui. As misturas usadas de 30%, 50% e 70% mostraram uma resistência de 99.4%, 90.2% e 86,4% respectivamente, essa tendência pode ser devido à diminuição da força adesiva entre os agregados de vidro e a pasta de cimento.

Terro (2005) concluiu através do seu estudo que betões com substituição 10% de agregado fino de resíduo de vidro tiveram maior resistência à compressão do que betões feitos com a substituição de agregado grosso e/ou com os dois tipos de agregado (fino e grosso) de resíduo de vidro a temperatura ambiente e elevada.

Shi e Zheng (2007) estudaram possíveis usos de resíduo de vidro na produção de cimento e betão, concluindo que o vidro como agregado tem um efeito ligeiramente negativo na resistência do betão, no entanto a sua preocupação recai sobre as expansões devido às reações álcalis-sílica.

Oliveira *et al.* (2008) concluíram que com a manutenção da trabalhabilidade, em misturas de relação água/cimento mantidas constante é possível manter a resistência característica de 40 MPa em todos os casos de substituição. A substituição parcial e total da areia natural pela areia de resíduos de vidro revelou uma significativa melhoria na resistência à compressão dos betões, nos quais a reação expansiva do tipo álcalis-sílica foi mitigada pela adição de cinza volante. Durante o estudo observaram que a medida que o teor de areia de vidro no betão aumenta, para teores de 25, 50 e 100%, a resistência à compressão aumentou na ordem de 24%, 25% e 29% respectivamente. Este efeito é foi obtido em misturas com adição de 30% de cinzas volantes, que ao controlarem a mitigação das reações expansivas, evitaram também o decréscimo das resistências. Geralmente a resistência à compressão de betões com agregados de vidro são inferiores aos betões com agregados naturais.

Serpa *et al.* (2012)^b ao estudar a aplicação de agregados de vidro como substitutos ao agregado natural até uma percentagem de 20%, afirma que a resistência à compressão é mais afetada pelos agregados finos, afirmando que este fator pode ser minimizado com a inserção de superplastificantes, de modo a manter a mesma trabalhabilidade e a mesma relação de a/c para todas as misturas.

Ali e Al-Tersawy (2012) concluíram quanto a resistência à compressão e módulo de elasticidade estático que estes diminuíram com o aumento do teor de vidro, constatando também problemas no contato entre a matriz de cimento e o vidro reciclado. Devido à diminuição de força de ligação entre a pasta de cimento e o vidro, resultado da superfície lisa dos resíduos de vidro.

Segundo Castro e Brito (2013), que estudaram misturas de betão com agregado fino de vidro, concluindo que o desempenho das misturas difere com o tamanho das partículas, apesar da resistência de 1000MPa do vidro, a resistência do betão diminui com o aumento do teor de vidro, a fraca ligação de interface entre agregados de vidro e a pasta de cimento é a principal razão dessa diminuição.

Metwally (2007), citado por Rashad (2014), relatou um aumento de 4.23% em betões com substituição de 20% de areia de vidro já a substituição de 60% de areia de vidro levou a uma redução de 6.6% aos 28 dias. Aos 90 dias observou-se uma diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor de areia de vidro.

Autores como Gautam *et al.* (2012) e Malik *et al.* (2013), citados por Rashad (2014), defendem que certos teores de resíduos de vidro aumentam a resistência à compressão, enquanto outros reduzem a mesma propriedade. Gautam *et al.* (2012) verificou que a substituição parcial da areia natural por resíduos de vidro (tamanho de 4.75-0.15 mm) em teores de 10 e 20% aumenta a resistência à compressão, já teores de 30% e 40% tem efeito contrário. Já Malik *et al.* (2013) afirma que teores de 10%, 20% e 30% de resíduo de vidro (tamanho 1.18 - 0 mm) aumentam a resistência à compressão do betão, já a substituição de 40% de areia de vidro levou a uma diminuição.

Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014) estudou o desempenho mecânico e a durabilidade de betões com agregado de resíduos de betão e de vidro reciclado, usando misturas com teores de 15%, 30%, 45% e 60%. Os resultados dos testes de resistência à compressão mostraram que o menor valor registado foi quando houve uma substituição de 60% de agregado fino por agregado de resíduo de vidro. Comparando os valores com o betão de referência verificou-se uma diminuição de 1.6%, 3.6%, 6% e 10.6% respetivamente.

2.3.2.2. Resistência à tração

Park *et al.* (2004) verificaram uma tendência decrescente com o aumento do teor de agregados de resíduo de vidro, comparativamente ao betão de referência, comportamento similar quando submetidos a forças compressivas. De entre as três misturas estudadas, 30%, 50% e 70%, os betões produzidos com o teor de 30% de agregado de resíduo de vidro apresentaram propriedades de resistência à tração maior.

Serpa *et al.* ^b(2012) concluíram que os agregados finos conduzem a piores resultados quanto à resistência à tração (por compressão diametral e por flexão) podendo este fato ser colmatado com

o uso de superplastificantes em vez de alterar a relação a/c nas situações em que se pretende manter a trabalhabilidade.

Ali e Al-Tersawy (2012), concluíram que a resistência à tração diminuiu com o aumento do teor de vidro na mistura, devido à superfície dos resíduos de vidro diminuírem a força de ligação entre o agregado de vidro e a pasta de cimento.

Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014) constatou, comparando as diversas misturas com a mistura de referência (com agregados naturais), que a resistência à tração para misturas com teores de 15%, 30%, 45% e 60% de agregado de resíduo de vidro, diminuíram 1.5%, 5.0%, 8.2% e 15.4% respectivamente, associando esta diminuição ao enfraquecimento da zona interfacial de transição.

2.3.3. Propriedades de Durabilidade

A durabilidade do betão define-se, em termos gerais como a capacidade do material resistir a ataques de natureza física ou química, sendo atualmente um dos principais focos de estudo na área dos materiais.

A durabilidade aparece assim associada à minimização da possibilidade dos agentes agressivos poderem ingressar no betão, o que poderá acontecer em determinadas condições ambientais, por mecanismos de transporte como permeabilidade, difusão ou capilaridade.

2.3.3.1. Absorção de água por capilaridade

Sendo o vidro um material impermeável, a inserção deste na mistura de betão reduz a sua permeabilidade, aumentando a sua durabilidade, pois limita a migração de água e de iões dentro da matriz do betão.

Oliveira *et al* (2008) concluíram que os betões com areia de resíduos de vidro apresentaram coeficientes de capilaridade inferior ou similar ao valor da mistura de referência.

Castro e Brito (2013) concluiu que as misturas com substituição de agregados grossos e finos de vidro simultaneamente mostraram um melhor desempenho na absorção de água por capilaridade, sendo mais eficiente, a substituição de 10% de agregado grosso e agregado fino. A elevada rugosidade juntamente com a relação de água/cimento contribuiu para o aumento da porosidade da estrutura interna, conduzindo por sua vez a um fraco desempenho da mistura.

Segundo Taha e Nounu (2007), a natureza impermeável do vidro a sua presença em misturas de betão pode reduzir a permeabilidade do mesmo. Verificando-se que a quantidade de água absorvida diminui com o aumento do teor de areia de vidro na mistura cimentícia, a presença de areia de vidro irá restringir a migração de humidade e iões no interior do betão. Reduzindo a demanda total de absorção de água, interrompendo a continuidade de microfissuras no interior do betão.

Rashad (2014) afirma, após analisar estudos realizados por Ling e Poon (2011, 2013), Bhandari e Tajine (2013), Malik (2013), entre outros, relataram a redução da absorção de água devido à inclusão de areia de vidro. Esta redução pode estar relacionada com a absorção de água negligenciável do vidro.

2.4. Reações álcalis-agregado

Segundo Lucca (2010), as reações álcali-agregado (RAA) são reações químicas que ocorrem entre álcalis provenientes principalmente do cimento e alguns minerais reativos existentes no agregado.

Como resultado destas reações a estrutura de betão deteriora-se, pois devido ao seu carácter expansivo, na presença de humidade gera fissuras, redução da resistência e aumenta a permeabilidade do material.

A reação álcali-agregado ocorre principalmente em estruturas de betão em contato com a água, como barragens, pontes, fundações, entre outras, esta reação afeta várias obras de engenharia civil, requerendo por vezes a substituição dos elementos afetados, afirmam Cunha e Cincontto (2008).

As reações podem ser classificadas em três tipos, em função dos mecanismos envolvidos e da composição mineralógica dos agregados:

- Reação álcali-silica
- Reação álcali-silicato
- Reação álcali-carbonato

Para que se possam desenvolver este tipo de reações é necessário existir presença de três condições, como a presença de fases reativas no agregado, humidade suficiente e uma concentração de hidróxidos alcalinos (K^+ , Na^+ e OH^-), Cunha e Cincontto (2008).

É, assim, fundamental conhecer as características dos agregados, para saber qual o tipo de reação que afetou a estrutura. Para descrever com maior facilidade todo o processo das RAA, é necessário o entendimento das propriedades químicas e físicas dos agregados.

2.4.1. Reações álcalis-sílica

Segundo Santos e Brito (2008), as reações álcalis-sílica (RAS) são manifestações patológicas que ocorrem em longo prazo no betão já endurecido, e apresentam-se como uma das principais condicionantes da durabilidade das estruturas de betão.

Observa-se que as RAS enquadram-se nas reações expansivas e são as que mais afetam o betão com agregados de vidro, sendo uma das grandes condicionantes à sua durabilidade, sendo este o motivo do seu destaque de entre as várias RAA.

A sílica (SiO_2) presente em alguns agregados reage com os iões alcalinos (OH^- , Na^+ e K^+) provenientes dos hidróxidos de álcalis existentes no cimento, formando um composto álcali-sílica.

Tabela 2.1. Fases da sílica nos vários tipos de agregado

Fases da sílica	Tipos de agregado
Vítrea	Vidros naturais e artificiais
Amorfa (forma mais desordenada e reativa)	Calcedônias, opalas
Microcristalina	Quartzo
Cristalizada metaestável	crystalistas e tridimitas

Por sua vez o composto álcali-sílica ao reagir com os iões de cálcio do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) forma um gel expansivo silicato de cálcio alcalino ou de sílica-cálcio.

O gel, produto das RAS, na presença de água aumenta de volume e expande-se entre os poros do betão criando forças expansivas, gerando tensões de tração. Ao atacar os pontos mais fracos, como os poros ou a superfície dos agregados, o gel causa fissuras e perda de resistência do material, afetando assim a durabilidade do elemento de betão.

As estruturas afetadas por esta reação podem apresentar vários tipos de manifestações como:

- Fissuras

- Expansão e/ou desalinhamento dos elementos estruturais
- Exsudação de gel (por vezes confundido por eflorescência)
- Lascamentos, denominados Pop-outs

As fissuras desenvolvem-se na superfície do betão, e podem apresentar duas variantes. Quando o elemento está sujeito a tensões elas possuem uma forma alinhada, mas caso o betão não esteja sujeito a tensões pré-existente estas manifestam-se em forma de mapa. Sendo também possível a combinação dos dois tipos.

Para além dos componentes do betão, como a composição dos agregados e o teor de álcalis do cimento, as condições do meio ambiente, como a humidade e a temperatura são fatores bastante influentes na reação álcalis-sílica.

Os álcalis provem principalmente do cimento, mas existem outras fontes externas. A utilização de água do mar na mistura pode influenciar o teor de álcalis no betão, tal como a absorção de água pelo contato de águas subterrâneas ricas em sulfato, assim como o contato com a água do mar. O teor de álcalis no betão depende ainda da permeabilidade do material, da porosidade, assim como do tempo em que este está exposto às fontes de álcalis.

A temperatura também é um propulsor das expansões geradas pelas RAS, segundo Foradada (2005) citada por Santos (2008), a velocidade de reação e a formação do gel aumentam com a temperatura, mas a sua viscosidade diminui, permitindo que se dissolva com mais facilidade nas fissuras e poros, dissipando-se em parte a expansão. Em suma as RAS desenvolvem-se mais rapidamente com o aumento da temperatura, aquando a uma temperatura menor a expansão torna-se mais lenta, o entanto prolonga-se por mais tempo.

A existência de água é essencial para o processo de hidratação do cimento, no entanto em grande quantidade pode ser considerada prejudicial. A abundância de água quer seja por contato externo direto, quer pela humidade relativa do ar, estimula a formação do gel expansivo.

Para que esta reação se desencadeie é necessário, para além de um agregado potencialmente ativo, álcalis do cimento, um teor de humidade entre 75-80%, afirma Silva (2009).

Segundo Poole (1992), citado por Lucca (2010), a expansão devido a RAS varia diretamente com a humidade relativa do betão, embora se despreze a reação expansiva baixo dos 70% HR, acima dos 80% os efeitos são visivelmente perceptíveis.

A prevenção deste acontecimento pode passar pela restrição do acesso da água ao betão, ou a inclusão de medidas mitigadoras, visto que é difícil controlar o acesso de água.

A composição do agregado é um fator bastante influente nas RAS, com o aumento da percentagem de agregado de vidro no betão há um aumento da taxa de expansão devido às reações álcalis-sílica que a inserção deste material desencadeia.

Rashad (2014) ao analisar estudos realizados por Limbachiya (2009), Kou e Poon (2009), Serpa (2013), afirmou que em geral a inclusão de areia de vidro na matriz cimentícia aumenta a expansão RAS, verificou ainda que a medida que o tamanho da partícula aumenta a expansão também aumenta. Mostrou ainda que a cor do vidro tem efeito significativo sobre a expansão ordenando-as do seguinte modo: azul - branco - âmbar - castanho - verde.

2.4.2. Medidas mitigadoras das Reações Álcali-Sílica

As medidas mitigadoras são ações tomadas de forma a prevenir ou reduzir os impactos negativos que possam comprometer o material ou a estrutura.

Não sendo possível evitar nem recuperar a deterioração dos elementos de betão provocada pelas reações álcali-agregado, é necessário prevenir o seu acontecimento. Como não é fácil evitar a difusão de humidade e o emprego de um cimento com baixo teor de álcalis ou de agregados, podemos optar por pôr em pratica algumas medidas mitigadoras, como a inserção de adições ativas como escoria de alto forno, metacaulino, entre outros que mitiguem as reações, de forma a evitar o seu aparecimento em futuras construções.

Ao longo dos anos autores como Park *et al.* (2004), Topçu *et al.* (2008) e Taha e Nounu (2009), têm documentados estudos com vários métodos de atenuar as RAS, eles incluem a substituição de cimento, o uso de minerais e aditivos químicos, bem como de reforço de fibras adicionais mencionando autores como. O efeito supressor de ASR também depende da dosagem quantidade, afirma Du e Tan (2014).

De modo a perceber qual o tipo de adição, a percentagem necessária para mitigar as RAS, foram realizados alguns estudos, de modo a perceber o seu comportamento perante os diferentes tipos de adição.

Cunha e Cincontto (2008), ao analisar teores de adições para mitigação da expansão álcali-agregado, constatou que a eficiência das adições variou consoante a sua composição química e mineralógica, e a sua proporção no cimento, assim como o grau de reatividade do agregado com o tipo de reação álcali-agregado. Demonstrando-se mais eficiente a sílica ativa, seguida pelo metacaulino, cinzas volantes e por fim escorias de alto forno.

A E 461, citada por Silva (2009), elaborada a partir dos dados publicados pela RILEM, recomenda a utilização dos seguintes teores por tipo de adição: sílica ativa de 10%, cinzas volantes siliciosas $\geq 30\%$, escória granulada de alto forno moída $\geq 50\%$, um teor de metacaulino na ordem dos 15% como efetivo no controlo e prevenção das RAS.

Lucca (2010), menciona o estudo de Munhoz (2007), que ao analisar a utilização de adições ativas como escoria de alto-forno, cinza volante, metacaulino e sílica ativa conseguiu mostrar que a capacidade das adições ajuda na redução da expansão, mas é dependente do teor utilizado, da composição química e mineralógica e o grau de reatividade do agregado.

Silva *et al.* (2010) afirma que os mecanismo de inibição parece estar relacionado com a redução de alcalinidade do meio, e conclui com base nos dados obtidos no seu estudo que com exceção das cinzas de biomassa, todas as adições minerais do tipo II são efetivas na mitigação das RAS, dependendo do tipo e do teor de adição utilizada.

Serpa *et al.*^a (2012) afirma que o emprego de misturas de agregados naturais reativos aos álcalis do vidro reciclado é viável sendo mais eficiente com agregados de natureza calcária.

Segundo Du e Tan (2014), afirmam que nem todos os métodos mitigadores mostraram aumento de eficiência com o aumento da quantidade das adições. Após o seu estudo concluíram que o teor eficiente para cada adição é cerca de 10-50% de cinza volante, 45-60% de escoria granulada de alto-forno, 12,5% para sílica ativa, 1,5-2,0% de fibras de aço e 0,5-2,0% de composto de lítio. Ordenando as várias adições pela sua eficiência: cinzas volantes, composto de lítio, escoria de alto-forno, sílica ativa e fibras de aço.

Rashad (2014) ao rever estudos como o de Taha e Nounu (2009) afirma que as expansões devido às RAS em argamassas e betões contendo areia de vidro podem ser mitigadas pela adição de 10-30% metacaulino, 20-50% cinzas volantes, 50-60% de escória de alto-forno, 10% sílica ativa, 1-2% de Ni_2CO_3 , 1% de nitrato de lítio ($LiNO_3$) e uma quantidade adequada de fibras.

2.4.2.1. Cinzas volantes

A cinza volante é um tipo de adição mineral obtido por precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão (Neville, 1997) é constituída principalmente por silicato vítreo contendo alumínio, ferro, afirma Lucca (2010).

Segundo Sherata *et al.* (1999) referidos por Lucca (2010), os fatores influentes são os teores de cálcio, sílica e álcalis. Os compostos CaO e SiO_2 afetam os produtos de hidratação devido a quantidade de cálcio e sílica no sistema, quanto maior a quantidade de sílica menor a relação Ca/Si dos produtos e/ou maior a quantidade destes, resultando numa maior quantidade de álcalis retirados da solução por esses produtos de hidratação. Já o alto teor em cálcio aumenta a relação Ca/Si dos produtos, reduzindo a quantidade de álcalis removidos da solução. Finalmente, quanto maior o teor de álcalis da cinza maior o seu desprendimento da cinza para a solução dos poros, resultando de uma maior alcalinidade.

O betão com cinzas volantes economiza energia e material virgem, o uso desta adição também aumenta a resistência à tração como melhora a trabalhabilidade, reduz a retração ou calor de

hidratação, melhora a resistência contra o ataque químico. No entanto também possui algumas desvantagens como o facto de retardar o processo de hidratação, o cuidado durante a cura deve ser maior e o facto de só melhorar a trabalhabilidade de misturas coesivas.

Segundo Bleszynski e Thomas (1998), citados por Lucca (2010), ao analisarem os betões com cinza volante, não constataram a presença da camada rica em cálcio, o gel rico em potássio permaneceu na superfície do agregado, mas o gel rico em sódio dispersou-se pela matriz cimentícia. A cinza volante reduz a disponibilidade de cálcio ao reduzir o conteúdo de Ca(OH)_2 , o gel torna-se mais fluido dispersando-se pela matriz cimentícia sem criar tensões internas. Afirmam ainda que o uso deste aditivo reduz à alcalinidade da solução dos poros, a permeabilidade, a mobilidade iônica e refina a estrutura dos poros.

Segundo Ferreira (2000), a substituição de 40% de cimento por cinza volante diminui três vezes o coeficiente de difusão de betões de elevado desempenho.

Sherata e Tomás, (2000), citados por Lucas (2010), afirmam que a existência de cinza volante, independentemente do seu teor ou tipo reduz a expansão comparada com o betão de referência (sem cinza volante ou qualquer outro aditivo). Mostram ainda que a medida que aumentamos o teor da substituição a redução também cresce. Enquanto que uma cinza volante com baixo teor em cálcio é capaz de manter a expansão abaixo dos 0.04% usando apenas um teor de 20%, uma cinza com alto teor de álcalis ou cálcio necessitava de um teor maior, entre 40ª 50%.

Segundo Cunha e Cincontto (2008), citando Malvar *et al* (2002), afirmam que a cinza volante é eficiente na minimização de RAA quando presente em teores de 25% a 35%.

Silva *et al.* (2010) concluíram no seu estudo ser suficiente uma substituição na ordem de 15-20%, sendo a par com o metacaulino as adições que melhor desempenho mostraram na mitigação das expansões devido à RAS.

Segundo Du e Tan (2014), afirmam que como é de conhecimento geral, as cinzas volantes é um subproduto industrial, e a sua utilização como substituição de cimento reduz o impacto ambiental negativo como melhora a durabilidade do betão. As cinzas volantes é um ótimo supressor das RAS, no entanto o uso de um teor superior a 40% leva a uma diminuição de 20% da resistência à compressão do betão, embora essa perda possa ser compensada pela reação pozolânica numa idade mais avançada.

2.4.2.2. Metacaulino

O metacaulino é uma adição mineral de elevada eficácia, e ao contrário de muitas adições minerais que geralmente são rejeitos industriais secundários, o metacaulino é um produto precedente de matérias-primas criteriosamente selecionadas, cujo processo de fabricação é totalmente controlado e rigoroso, possuindo normatização, ASTM C618.

Proveniente da caulinita, o metacaulino é obtido pela calcinação entre 700°C e 800°C, sendo constituído basicamente por 51% de sílica (SiO_2) e 41% de alumina (Al_2O_3), possui uma cor branca e o seu peso específico é aproximadamente duas vezes menor que o do cimento.

Os compostos a base de sílica do metacaulino reagem com o hidróxido de cálcio presente no cimento, formando produtos mais resistentes, estáveis, insolúveis, fazendo com que sobre menos do composto para ser lixiviado, devido a sua característica altamente solúvel ou reagir com sulfatos, responsável por gerar reações danosas fissurando o betão

A reatividade pozolânica de um metacaulino depende da sua cristalinidade de origem, da granulometria e do grau de amorfização. O tamanho de partícula de metacaulino é menor do que as partículas de cimento, mas não tão fina como pó de sílica.

O uso de metacaulino não produz apenas redução dos impactos ambientais, como se trata de uma pozolana de alta eficiência, melhora o desempenho, a durabilidade entre outras características do betão.

De acordo com o fabricante, a adição deste material aumenta a resistência mecânica à compressão e tração, reduz a capilaridade e porosidade tornando o betão mais impermeável, impossibilitando a penetração de agentes erosivos como cloretos e sulfatos, inibe ainda as RAA e proporciona melhorias na zona de transição pasta de cimento e agregado (Beltrão e Zenaide, 2010)

Segundo Cunha (2008), citando Malvar *et al* (2002) o metacaulino é eficiente na minimização de RAA quando presente em teores próximos de 10%.

Silva et al. (2010) afirmam a eficiência de 10-20% de metacaulino, constatando que a partir de 10% existe uma redução de aproximadamente 91% a 1 ano. A substituição de 10% de cimento por metacaulino já é suficiente para mitigar as expansões associadas às RAS.

2.4.2.3. Pó de vidro

O vidro tem potencial para desenvolver as RAS quando usado como agregado, já ao ser esmagado adquire propriedades pozolânicas, o que confere ao betão, quando presente, novas características.

Shi e Zheng (2007) afirmam que o pó de vidro moído apresenta uma boa reatividade pozolânica podendo ser utilizado como um substituto do cimento, as suas propriedades pozolânicas aumentam a medida que o tamanho das suas partículas diminuem. Os resultados dos testes de ASTM C 1260 indicam que a expansão da RAA diminui com o aumento do teor de substituição de vidro.

Serpa *et al.*^a (2012) afirma no seu estudo que natureza química e mineralógica do vidro permite que este possa ser utilizado como adição tipo II, desde que tenha granulometria fina. Citando Corinaldesi *et al.* (2005) que verificaram a utilização de vidro em pó (< 100 µm) produz melhorias no desempenho mecânico. Taha e Nounu (2008) concluíram que o pó de vidro conduz à diminuição da concentração do ião hidroxilo na solução encontrada nos poros, considerada responsável pela redução do risco de expansão devido à RAS. Pontes *et al.* (2011) verificaram que pó de vidro, obtido por britagem de vidro reciclado (dimensão < 125 µm), apresentava uma reatividade pozolânica semelhante à de cinzas de biomassa. Concluiu, no fim do seu estudo que o vidro reciclado apresenta potencial como agregado ou adição mineral, a sua influência na RAS depende do teor e da granulometria da substituição. O vidro moído tem propriedades que possibilitam o seu uso como pozolana, podendo ser empregue como adição mineral na mitigação de RAS, quando na presença de agregados reativos naturais. A aplicação do vidro aumenta com a diminuição da granulometria. A possibilidade de emprego de misturas binárias, aumenta a utilização de vidro reciclado em materiais cimentícios, incrementando a capacidade mitigadora das adições minerais.

Rashad (2014) relata que a inserção de areia de vidro aumenta a expansão RAS à medida que o seu teor presente no betão também aumenta, assim como com o aumento do tamanho da partícula, no entanto refere que alguns investigadores afirmam que partículas de vidro com apenas 0.3 mm é suficiente para suprimir a expansão RAS.

3. Procedimento experimental

3.1. Introdução

No âmbito de analisar o comportamento de betões com agregados de vidro, foi realizado um estudo experimental nos Laboratórios de Construção da Universidade da Beira Interior.

O objetivo principal foi avaliar a influência da substituição dos agregados naturais (finos e grossos), por agregado de vidro reciclado no comportamento do betão.

Podem-se apontar duas fases no betão, o estado fresco e o estado endurecido. Na primeira fase observa-se a trabalhabilidade. A resistência à compressão, módulo de elasticidade, porosidade, são outros exemplos de propriedades do betão conferidos na segunda fase.

Os ensaios realizados no estado fresco tiveram como objetivo avaliar a influência do aumento do teor de vidro tanto como agregado fino ou agregado grosso na trabalhabilidade das misturas.

Já os ensaios realizados no estado endurecido tiveram como finalidade avaliar a influência da adição de agregados de vidro na resistência à compressão, comparativamente ao betão de referência com agregados naturais.

As características dos materiais que compõem as misturas são apresentadas a seguir.

3.2. Materiais

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios estudados neste capítulo foram seleccionados após a devida pesquisa bibliográfica e de acordo com os requisitos normativos especificados, tendo em conta o material existente e disponível no Laboratório de Engenharia da Universidade da Beira Interior.

3.2.1. Cimento

O cimento usado no desenvolvimento deste trabalho foi o cimento Portland CEM I 42,5R, com massa volúmica de 3140 kg/m³, de acordo com a norma NP EN 197-1: 2001.

3.2.2. Agregados

Quanto a escolha dos agregados utilizou-se agregados existentes no laboratório, como é o caso dos agregados finos e grossos de origem natural, tendo em conta as suas granulometrias. Os agregados de resíduos de vidro foram produzidos em laboratório (recolha, tratamento, beneficiamento e seleção).

3.2.2.1. Agregados naturais

Os agregados naturais dividem-se consoante a sua granulometria em agregado fino e agregado grosso. Sendo que para o agregado fino foi utilizada uma areia amarela proveniente do rio Tejo, de origem fluvial, designada areia grossa, com granulometria compreendida entre 0 a 4 mm.

Como agregado grosso foi utilizado uma mistura de brita e pedrisco, com uma granulometria compreendida entre 4 a 16 mm e 1 a 4 mm respectivamente. Seleccionando-se o material consoante a granulometria conforme será explicado.



Figura 3.1. Pedrisco e brita utilizados no estudo

3.2.2.2. Agregado de vidro

Os agregados de vidro são provenientes de resíduos sólidos urbanos, como garrafas com destino à reciclagem. As garrafas foram fornecidas por vários estabelecimentos na região da Covilhã, não havendo controlo na percentagem de cada cor.

Os resíduos foram devidamente tratados por lavagem, evitando assim a contaminação do agregado produzido por outro tipo de resíduo existente nas garrafas, a fim de não comprometer os resultados.



Figura 3.2. Britador de mandíbulas

As garrafas foram reduzidas em partículas de agregados com a ajuda de um britador de mandíbulas, de modo a obter uma granulometria semelhante ao agregado fino (areia) e grosso natural (pedrisco e brita 1), cuja massa vólumica ronda os 2500 kg/m³.



Figura 3.3. Vidro após ser reduzido a partículas

3.2.3. Água de amassadura

Foi utilizada água potável da rede pública, embora não existisse nenhuma preocupação especial quanto a este componente, considera-se a conformidade da mesma com a norma NP EN 1008:2003.

3.2.4. Adições

De modo a mitigar as reações possíveis entre os agregados e o cimento (reações álcali-sílica) foi utilizada uma adição ativa. Deste modo optou-se por uma cinza volante, devido a sua disponibilidade no Laboratório de Construção e às suas propriedades pozolânicas, cuja massa volúmica ronda os 2380 kg/m³.

3.2.5. Adjuvante

De entre os inúmeros tipos de adjuvantes existentes e dos vários tipos optou-se pela utilização do “superplastificante Sika Viscocrete 3005”, de acordo com a NP EN 934:2-2009. Este superplastificante tem numa densidade de 1050 kg/m³ aproximadamente, é basicamente uma solução aquosa de policarboxilatos modificados. E é indicado para betões de classe igual ou superior a C30/37.

Uma vez esse trabalho pretende dar continuidade ao estudo realizado por Machado e Sainhas, (2007) estabeleceu-se a dosagem de 0.6% de superplastificante tal como a utilizada por esses autores.

3.3. Caracterização dos materiais

3.3.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada para os agregados naturais e para os agregados de resíduos de vidro, com o auxílio de uma peneiradora mecânica, que através da rotação e oscilação separa os resíduos, consoante o seu tamanho. Foi utilizada uma balança de precisão KERN PCP cuja capacidade máxima é de 10kg e a sua precisão de 0.1 grama, e ainda os peneiros de malha quadrangular cuja abertura será mencionada a seguir.

Neste projeto foi necessário ter em atenção a quantidade de material existente no laboratório, como é o caso do agregado natural, e a quantidade de material proveniente dos resíduos de vidro coletados. Deste modo optou-se por ajustar a granulometria do material existente em laboratório ao material produzido com os resíduos de vidro com a ajuda do britador.

Primeiramente, e devido a abundância de agregado natural, efetuou-se a análise granulométrica do vidro, de forma a adaptar-se a granulometria dos agregados naturais à granulometria dos agregados de vidro, tanto grossos como finos. Procedeu-se do seguinte modo:

- i. Colocaram-se os agregados de resíduo de vidro na estufa ventilada durante 120 minutos a 100 °C.
- ii. Colocou-se o agregado de resíduos de vidro no peneiro com malha de 4 mm, e com o auxílio da máquina de peneiração, de modo a separar o agregado grosso do agregado fino.



Figura 3.4. Estufa e peneiro utilizados neste estudo

Todo o agregado que fica retido no peneiro com malha de 4 mm é considerado grosso, todo aquele que passou pelas malhas do peneiro é considerado fino.

Posteriormente repetiu-se o processo de modo a analisar a granulometria dos diferentes tipos de agregado, colocaram-se os peneiros por ordem crescente na máquina de peneiração. Para o agregado grosso foram utilizados cerca de 8 kg e para o agregado fino cerca de 600 gramas, dividiram-se em três frações de modo a facilitar a peneiração.

- i. Pesaram-se os peneiros, individualmente.
- ii. Colocou-se agregado de brita de vidro no peneiro superior, constituído por 3 peneiros de malhas 16 mm, 8 mm e 4mm.
- iii. Ligou-se a máquina de peneiração por 10 minutos.
- iv. Pesaram-se os peneiros com agregado e registaram-se os valores.

Para o agregado fino o procedimento foi semelhante, apenas os peneiros variaram, nesta etapa utilizaram-se peneiros de malhas 2 mm, 1 mm, 0.500 mm, 0.250 mm, 0.125 mm e 0.063 mm.

A média das massas retidas em cada peneiro auxiliou no traçado das curvas granulométricas do agregado de brita de vidro e do agregado de areia de vidro, respectivamente representadas:

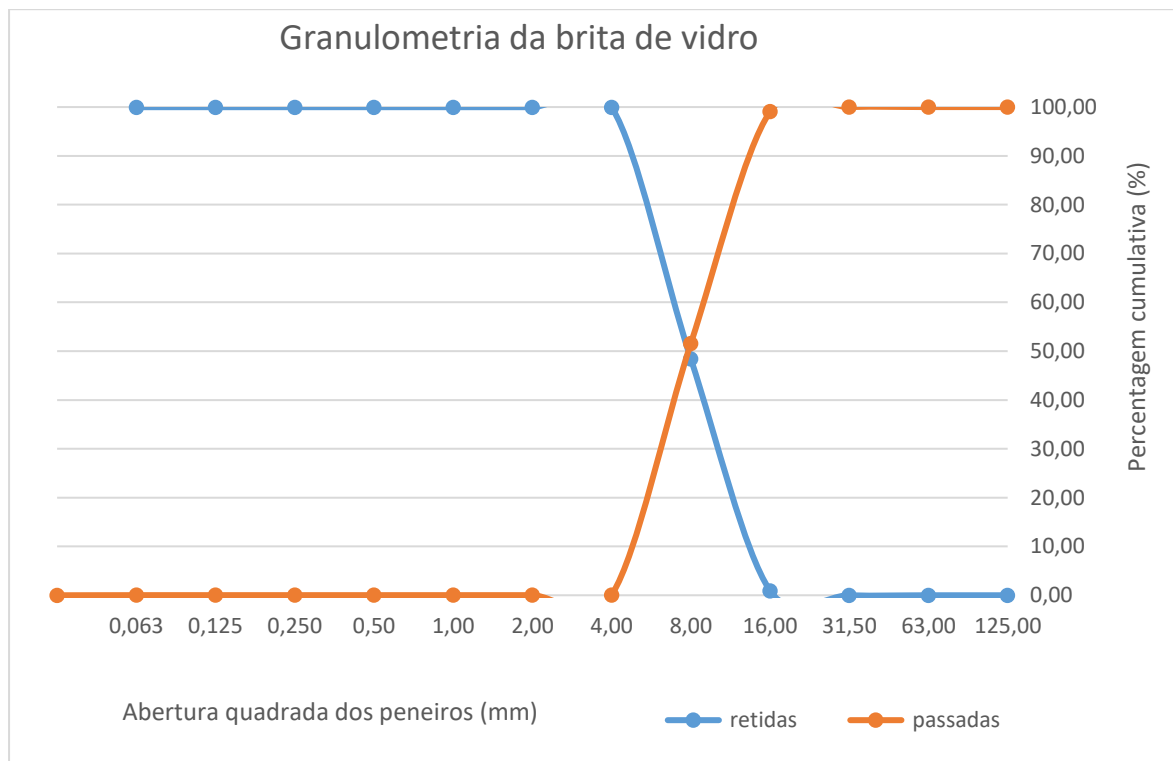


Figura 3.5. Curva granulométrica característica da brita de vidro

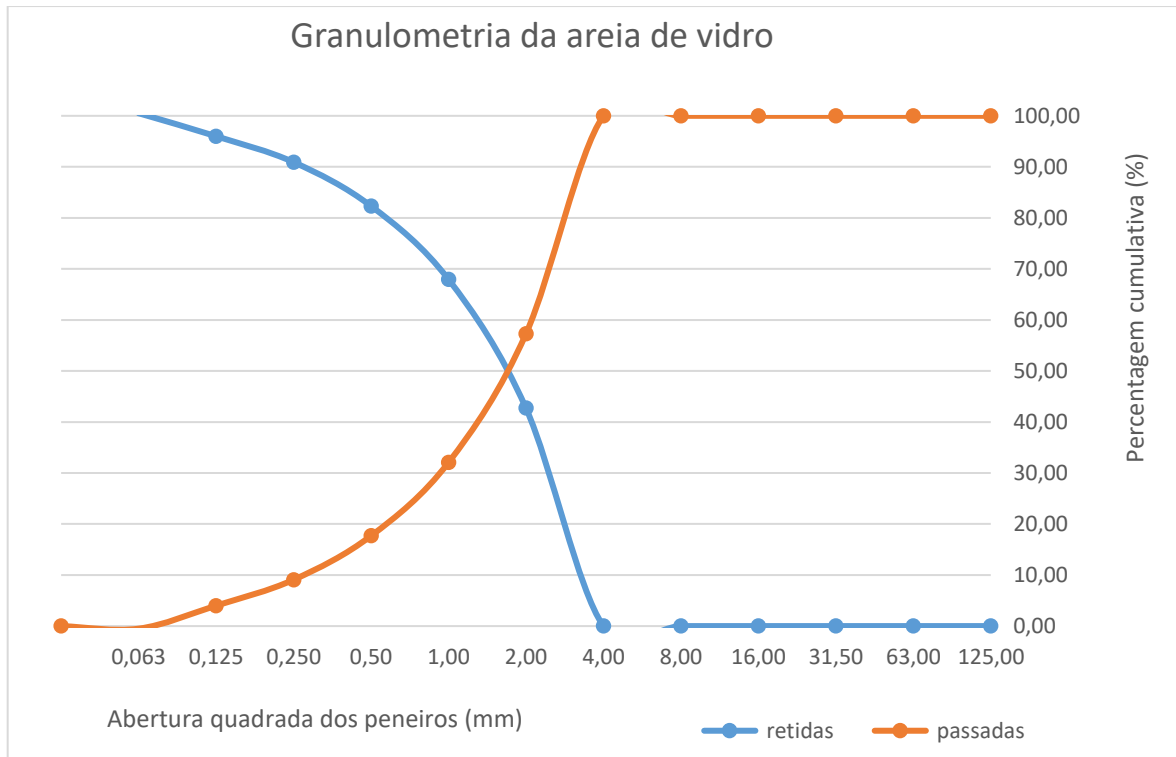


Figura 3.6. Curva granulométrica característica da areia de vidro

De forma a obter um agregado de brita natural com granulometria semelhante a do agregado de brita de vidro reciclado foi necessário misturar a brita com o pedrisco, adaptando as porcentagens de cada um. Quanto ao agregado de areia natural foi apenas necessário adaptar as porcentagens de areia retida em cada peneiro. Deste modo:

- i. Peneirou-se o agregado natural, foram aproveitados os peneiros utilizados anteriormente para peneirar o agregado de vidro, durante 10min.
- ii. Separou-se o material em diferentes sacos.
- iii. Pesaram-se os sacos.
- iv. Misturam-se as granulometrias em igual proporção a do agregado de vidro, igualando deste modo a granulometria do agregado natural ao agregado de vidro.

Nas tabelas seguintes (Tabela 3.1 e Tabela 3.2) são apresentadas a granulometrias características do agregado de brita de resíduo de vidro, e da areia de resíduo de vidro respectivamente obtidas após a análise granulométrica. Estas granulometrias serão usadas na elaboração das diferentes misturas para a produção dos betões.

Tabela 3.1. Granulometria característica do agregado de brita de resíduo de vidro

Granulometria da brita de vidro				
Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Material retido		Percentagens acumuladas	
	(g)	(%)	Passados	Retidos
			(%)	(%)
16,00	66,00	0,94	99,06	0,94
8,00	3350,70	47,50	51,57	48,43
4,00	3636,00	51,54	0,03	99,97
2,00	0,00	0,00	0,00	99,97
Material restante no fundo	1,80	0,03	0,00	100,00
Total	7054,50	100,00		

Tabela 3.2. Granulometria característica do agregado da areia de resíduo de vidro

Granulometria da areia de vidro				
Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Material retido		Percentagens acumuladas	
	(g)	(%)	Passados	Retidos
			(%)	(%)
4,00	0,00	0,00	100,00	0
2,00	251,80	42,73	54,91	45,09
1,00	148,60	25,22	29,70	70,30
0,50	84,70	14,37	15,32	84,68
0,250	50,70	8,60	6,72	93,28
0,125	29,90	5,07	1,65	98,35
0,063	23,60	4,00	-2,36	102,36
Material restante no fundo	0,00	0,00	0,00	100,00
Total	589,30	100,00		

3.3.2. Composição do betão

Após a análise granulométrica do agregado de resíduo de vidro, os teores dos componentes de cada agregado natural adoptados são os seguintes:

Tabela 3.3. Teores de granulometria para cada tipo de agregado

Agregado natural fino	Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Teor (%)	Agregado natural grosso	Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Teor (%)
		2,000		43	
	1,000	25			
	0,500	14			
	0,250	9			
	0,125	5		4,000	50
	0,063	4			

O traço das misturas a serem estudadas foi definido com base no trabalho de Machado e Sainhas (2007), sendo os teores de substituição determinados pelos mesmos autores. O traço utilizado está descrito na seguinte Tabela 3.4, e foi determinado para um betão de referência, com agregados naturais:

Tabela 3.4. Traço, em massa (kg), da mistura do betão de referência

<i>Material</i>	<i>Cimento</i>	<i>Água</i>	<i>Cinza volante</i>	<i>Areia</i>	<i>Brita</i>
Massa (kg)	1	0.6	0.29	1.87	3.14

Para a realização deste estudo estipulou-se que os teores de vidro a serem substituídos seriam 50 e 100% para ambos os agregados (areia e brita), desta forma foram produzidas quatro misturas para além do betão de referência, esta com teor de vidro 0%, servindo deste modo para comparações. As misturas com substituição parcial ou total dos agregados naturais foram produzidas com as seguintes percentagens de substituição:

- M 50/50: betão com substituição de 50% da areia natural por areia de vidro e 50% de brita natural por agregado grosso de vidro;

- M 50/100: betão com substituição de 50% de areia natural por areia de vidro e 100% de brita natural por agregado grosso de vidro;

- M 100/50: betão com 100% de substituição da areia natural por areia de vidro e 50% de substituição da brita natural por agregado grosso de vidro, e

- M 100/100: betão com 100% de areia de vidro e agregado grosso de vidro.

Tendo em conta o número de corpos de prova necessários para cada propriedade a ser medida as quantidades de materiais foram definidas para o traço proposto na tabela 3.4 para a produção dos mesmos e estas são apresentadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5. Tipo de misturas com as devidas quantidades e substituições

Tipo de Mistura	Cimento (kg)	Cinza volante (kg)	Areia natural (kg)	Areia de vidro (kg)	Brita natural (kg)	Brita de vidro (kg)
M Ref.	6	1.74	11.22	-	18.84	-
M 50/50			5.61	5.61	9.42	9.42
M 50/100			5.61	5.61	-	18.84
M 100/50			-	11.22	9.42	9.42
M 100/100			-	11.22	-	18.84

3.4. Procedimento de mistura

Após se determinarem as quantidades de cada elemento procedeu-se a realização das misturas. Neste caso, utilizou-se uma betoneira de eixo vertical, que facilita a mistura de todos os componentes conferindo ao betão maior homogeneidade.

Utilizou-se para a medição das massas dos materiais uma balança AND FV 60K, com capacidade máxima de 60 kg e precisão de 0.02kg.

Um procedimento de mistura foi adotado com a finalidade de garantir uniformidade e homogeneidade das misturas estudadas, em detalhes foram executadas as seguintes etapas:

- Pesaram-se todos os materiais na balança descrita precedentemente.
- Colocaram-se os agregados grossos na betoneira, com 50% de água.
- Misturou-se durante 1 minuto.
- Colocou-se então o cimento previamente misturado com a cinza volante (adição).
- Adicionou-se o agregado fino com os restantes 50% de água.
- Acrescentou-se superplastificante.
- Deixou-se completar o período de 3 a 4 minutos.



Figura 3.7. Aspecto do betão após mistura

3.5. Ensaios do betão no estado fresco

A análise da trabalhabilidade dos betões frescos foi realizada através dos ensaios de abaixamento do tronco de cone e da mesa de espalhamento, logo após a mistura.

3.5.1. Ensaio do abaixamento do tronco de cone (slump test)

O ensaio de abaixamento, teste do cone de abaixamento, (Slump test) foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-2:2009, este ensaio foi realizado para todas as misturas.

Para a realização deste ensaio foi necessário uma haste de socamento de 60x16cm, um tronco de cone com 30 cm de altura, cujo topo possui um diâmetro de 10 cm e a base 20 cm, e uma régua.

- i. Colocou-se o tronco-cônico sobre uma placa metálica nivelada. Colocam-se os pés nas abas inferiores do tronco.
- ii. Preencheu-se o tronco-cônico com betão, em 3 camadas, recebendo cada camada 25 golpes com a haste de socamento, penetrando parcialmente a camada anterior.
- iii. Após a última camada, retirou-se o excesso de betão com a ajuda de uma régua metálica, de forma a alisar a superfície.
- iv. Retirou-se com um só movimento o molde, o betão abateu-se pelo seu próprio peso.
- v. Colocou-se o tronco-cônico ao lado da mistura de betão moldada e com a ajuda da haste apoiada no topo do tronco-cônico, mediu-se o abaixamento.

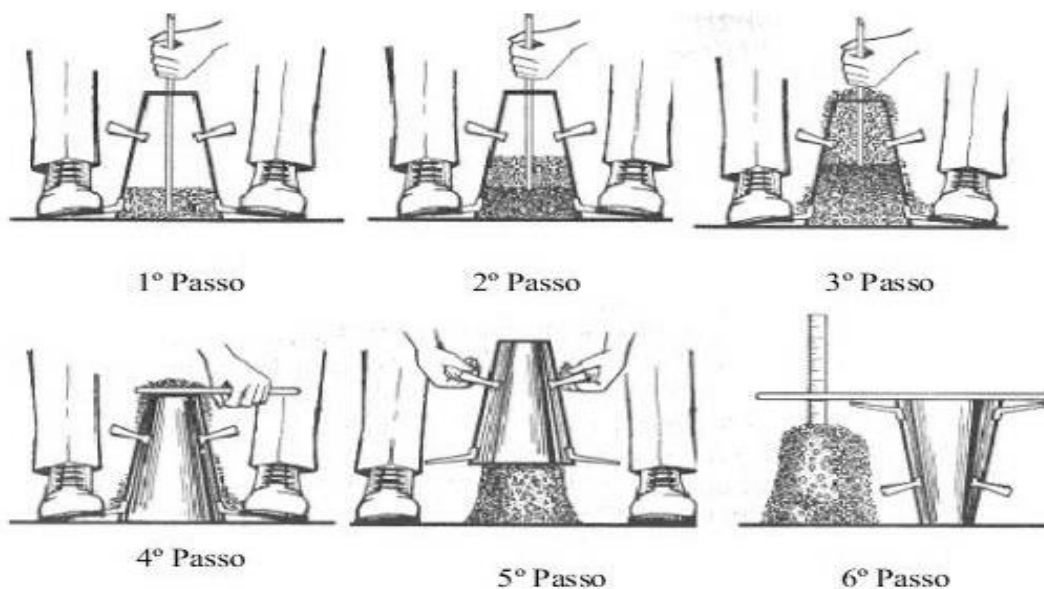


Figura 3.8. Procedimento do ensaio do tronco de cone

(<http://3.bp.blogspot.com/-hGEYgzmJ9Vg/UeaUYgu0oOI/AAAAAAAAABK8/Fa3CZ0219vU/s1600/SLUMP+2.jpg>)

3.5.2. Ensaio da mesa de espalhamento (mesa de Graff)

O ensaio de espalhamento foi realizado para todas as misturas, encontrando-se no estado fresco, de acordo com a norma NP EN12350-5 de 1999, de modo a analisar a consistência do betão.

- vi. Colocou-se a mesa de espalhamento no chão, de modo a esta ficar nivelada.
- vii. Limpou-se a mesa de espalhamento e o tronco-cónico com um pano humedecido
- viii. Centrou-se o tronco-cónico e preencheu-se de betão com duas camadas iguais.
- ix. Cada camada recebeu 10 golpes com a haste de socamento de modo a compactar a mistura.
- x. Após a última camada, retirou-se o excesso de betão com a ajuda de uma régua metálica, de forma a alisar a superfície.
- xi. Removeu-se o molde.
- xii. Levantou-se a placa superior com a ajuda da pega deixando-se cair por 15 vezes.
- xiii. Mediu-se o diâmetro do espalhamento em duas direções.

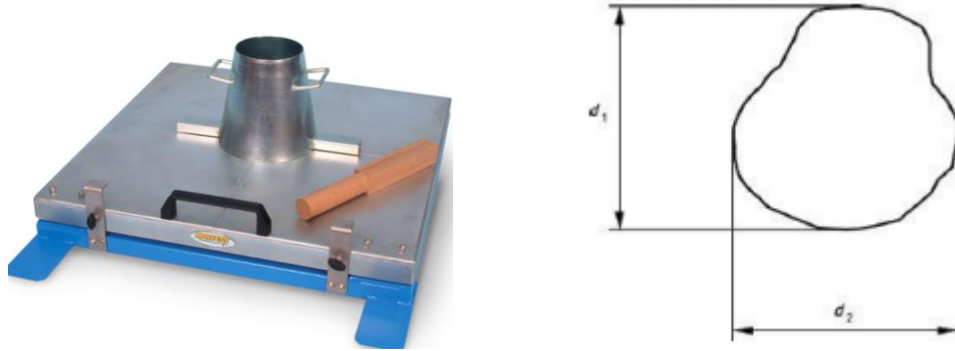


Figura 3.9. Mesa de espalhamento

Depois de medidos os dois diâmetros é possível calcular o diâmetro médio de cada mistura, assim como a área relativa de espalhamento através da formula:

$$f = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

3.5.3. Medição da massa volúmica

A massa volúmica é definida pela relação entre a massa de um corpo e o volume que o mesmo ocupa. Deste modo a massa volúmica foi determinada para cada mistura produzida, no estado fresco, de acordo com a norma NP EN 12350-6: 2009:

- i. Pesaram-se os moldes vazios, registando-se o seu valor
- ii. Encheram-se os moldes com a mistura de betão
- iii. Compactaram-se os corpos de prova com um vibrador
- iv. Rasaram-se os moldes com a ajuda de uma régua
- v. Pesaram-se os moldes com a mistura de betão
- vi. Calculou-se a massa volúmica de acordo com a fórmula:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{v}$$

Sendo:

D - massa volúmica do betão fresco, kg/m³

m₁ - massa do molde, kg

m₂ - massa do molde com a mistura de betão, kg

V- volume do molde, m³

3.6. Ensaio do betão no estado endurecido

Para a determinação das propriedades físicas e mecânicas do betão foram moldados corpos de prova cúbicos de 150 mm de arestas, segundo a norma NP EN 12390-2. Um vibrador de imersão foi utilizado para compactar as misturas.

Os corpos de prova foram mantidos em uma estufa com 22°C e 95% de humidade relativa durante 24 horas, sendo então realizada a descofragem dos mesmos. Logo após a descofragem, os corpos de prova foram devidamente identificados e mantidos na estufa até completarem a idade de 28 dias.



Figura 3.10. Betão nos moldes por compactar e compactado

3.6.1. Medição da massa volúmica

A massa volúmica no estado endurecido foi calculada tendo em conta as características físicas dos corpos de prova, deste modo todos os corpos de prova depois de desmoldados e curados, foram medidos e pesados. Registou-se a área da base, a altura e o peso dos mesmos antes de se proceder as restantes ensaios. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-7 (2003).

Calculou-se a massa volúmica para cada provete no estado endurecido pela fórmula:

$$m_v = \frac{\text{peso}}{\text{volume}} = \frac{\text{peso}}{\text{área da base} * \text{altura}}$$

3.6.2. Determinação da velocidade ultrassônica e do módulo de elasticidade dinâmico

Os ensaios de ultrassom foram realizados nos corpos de prova com dimensões de 15 x 15 x 15 cm aproximadamente, segundo a norma BS 1881-203/1986. Este ensaio consiste na determinação da velocidade de propagação de um impulso ultrassônico entre dois pontos de medida (figure 11). Este ensaio permite obter informações sobre as características mecânicas, a homogeneidade e a presença de fissuras e defeitos.

Antes de se realizar o ensaio em si, foram pesados todos os corpos de prova, seguidamente foram colocados um emissor e um receptor em faces opostas, o ensaio foi realizado em duas direções. Primeiramente mediu-se o tempo em microssegundos paralelamente a face de identificação do corpo de prova, registando-se a sua largura, posteriormente repetiu-se o mesmo processo para a face perpendicular. Todos os valores foram registados.

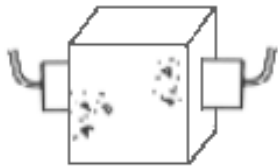


Figura 3.11. Corpo de prova em perspectiva

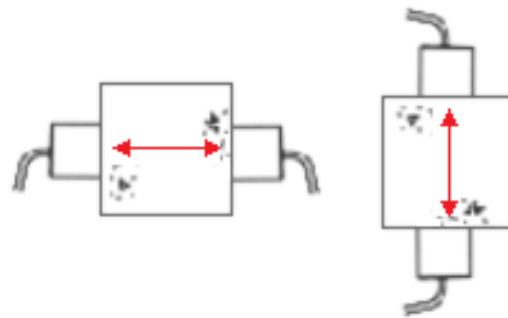


Figura 3.12. Vista em planta das direções das medições

3.6.3. Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão das misturas foi determinada em conformidade com a NP EN 12390-3: 2009 aos 28 dias, em cubos de 150 mm de aresta, mantidos em condições de temperatura e humidade.

Os corpos de prova são colocados numa máquina de ensaio à compressão com uma capacidade máxima de 3 000kN:

- i. Verificou-se que a prensa estava livre de sujidade e objetos que pudessem comprometer o ensaio

- ii. Colocaram-se os corpos de prova no centro do prato inferior
- iii. Posicionaram-se os corpos de prova de forma a que a carga seja aplicada perpendicularmente à direção da moldagem
- iv. Aplica-se a carga de 13,5 kN/s, de forma contínua e gradual
- v. Aumenta-se a carga até o corpo de prova ceder (atinge a rotura)
- vi. Registram-se os valores de carga máxima suportada pelo provete antes da rotura



Figura 3.13. Prensa utilizada para os ensaios de compressão

Ao retirarem-se os corpos de prova da prensa procedeu-se ao registo fotográfico, pode-se verificar que os corpos de prova apresentam uma rotura do tipo normal.



Figura 3.14. Rotura do tipo normal

Após este procedimento pode-se então calcular a resistência à compressão, usando para isso a expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} [\text{Mpa ou N/mm}^2]$$

Sendo:

f_c - a resistência à compressão [Mpa]

F - carga máxima à rotura [N]

A_c - a área da secção transversal do provete, onde é aplicada a força [mm²]

3.6.4. Absorção por capilaridade

Para a determinação da absorção de água por capilaridade o método de ensaio foi realizado segundo o normalizado pela especificação LNEC E393 - Determinação da absorção de água por capilaridade. Este ensaio tem uma duração de 72h e as medições são realizadas às 3, 6, 24 e 72h.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados em corpos de prova de 7,5 x 7,5 x ± 15 cm.

- i. Secaram-se os corpos de prova na estufa a uma temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24h, tempo em que apresentaram uma massa constante.
- ii. Registou-se a massa inicial dos corpos de prova (m_0).
- iii. Seguidamente colocaram-se num tabuleiro em contato com água, cerca de 5 ± 1 mm de profundidade.
- iv. A cada tempo estipulado, retiraram-se os corpos de prova, com o auxílio de um tecido húmido removeu-se o excesso de água e pesaram-se os corpos de prova (m_i).
- v. Recolocando-se os corpos de prova no recipiente imediatamente após a pesagem, até à próxima pesagem.



Figura 3.15. Corpos de prova durante o ensaio de capilaridade



Figura 3.16. Pesagem dos corpos de prova

A absorção de água é calculada dividindo o aumento de massa ao fim dos intervalos de tempo estipulados na norma, pela área da face inferior do provete que esteve em contato com a água. Deste modo temos:

$$\text{Absorção capilar} = \frac{m_i - m_0}{A}$$

4. Apresentação e discussão dos resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados anteriormente, de modo a caracterizar as várias misturas de betões com os vários teores de agregados de resíduos de vidro. Os resultados serão apresentados de acordo com sequência da descrição dos ensaios, para facilitar a análise e compreensão, assim como no capítulo anterior, haverá a distinção entre o estado fresco e o estado endurecido. Serão apresentados figuras e tabelas de modo a facilitar a compreensão e discussão dos dados obtidos ao longo dos ensaios realizados, facilitando a análise e a avaliação das propriedades dos betões com as diferentes dosagens de agregado de resíduo de vidro.

4.1. Ensaios do betão fresco

Como foi mencionado anteriormente no capítulo 3.5 os ensaios realizados no estado fresco ajudaram a avaliar a trabalhabilidade das misturas de betão, analisando os resultados obtidos nos ensaios realizados.

4.1.1. Consistência do betão pelo abaixamento do tronco de cone

A Figura 4.1 apresenta os resultados, para todas as misturas produzidas, de consistência do betão fresco obtida pelo método do abaixamento do tronco de cone.

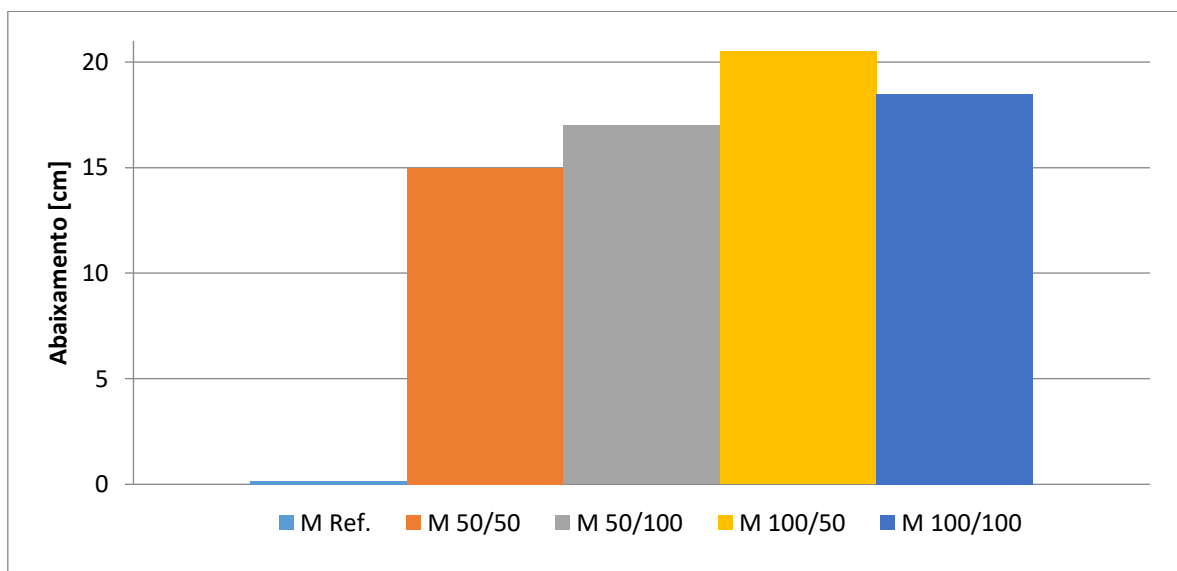


Figura 4.1. Consistência pelo método do abaixamento do tronco de cone

Denote-se que o abaixamento do betão de referência é quase nulo, registando-se um valor de 15 mm, enquanto as restantes misturas pode-se verificar os elevados valores, todos superiores a 15 cm, registando-se o valor máximo de 20,5 cm na mistura M 100/50.

O aumento deve-se praticamente à presença de vidro como agregado e à sua impermeabilidade, enquanto que na mistura de referência o agregado natural absorveu a maior parte da água da mistura, tornando a mistura mais coesa, as restantes misturas, por possuírem agregados de vidro independentemente do seu teor tornou a mistura menos coesa.

Em todas as misturas com agregados de vidro o cone resultante deste ensaio não se verificou, quando da remoção do molde, a mistura perdeu a forma. Pode-se especular que a dificuldade de coesão das misturas com a presença de agregados de vidro tenha sido também influenciada pela forma dos agregados que para o vidro é tendencialmente lamelar ou irregular.



Figura 4.2. Abaixamento do tronco de cone para o betão de referência e para as misturas com agregados de vidro

4.1.2. Ensaio da mesa de espalhamento

Este ensaio permitiu-nos através da análise do diâmetro método avaliar a deformabilidade do betão no estado fresco. Depois de registados todos os valores referentes às cinco misturas de betão, calcularam-se os diâmetros médios e elaborou-se o gráfico presente na Figura 4.4.



Figura 4.3. Obtenção do valor do diâmetro do teste da mesa de espalhamento

Tento em conta a diferença de “permeabilidade” do agregado natural e de vidro consegue-se prever que a tendência observada no ensaio do abaixamento do tronco de cone. De facto, a mistura de referência apresenta valor de diâmetro de espalhamento mais baixo que as restantes misturas contendo agregado de vidro nas suas diferentes proporções. Uma vez que o agregado natural absorve maior quantidade de água do que o agregado de vidro, essa característica torna a mistura mais consistente.

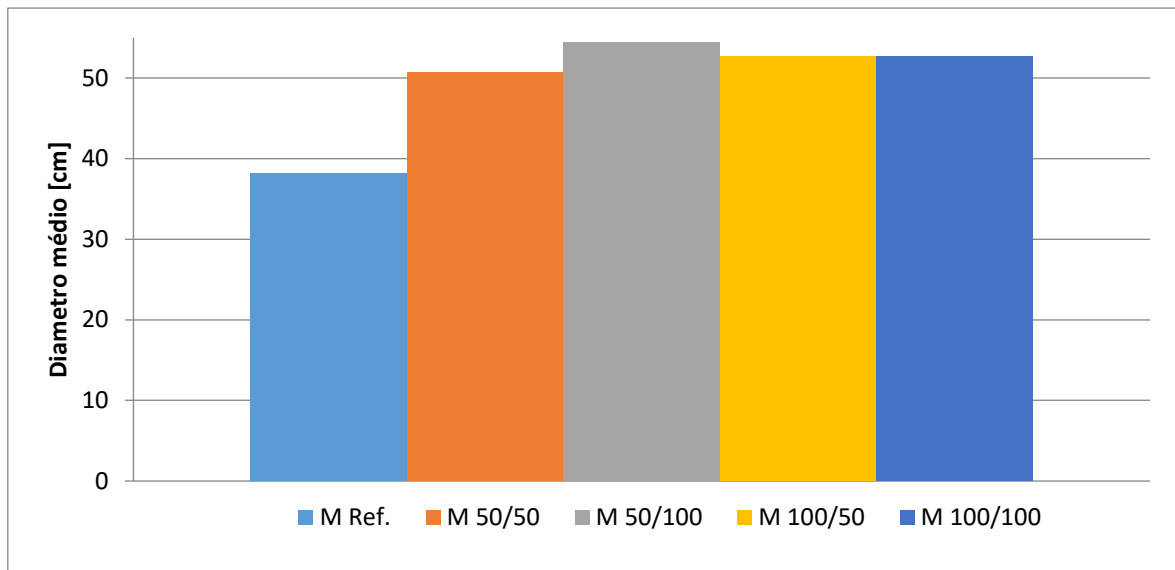


Figura 4.4. Consistência pelo método da mesa de espalhamento

Registou-se um aumento de diâmetro com o aumento da substituição do agregado natural por agregado de vidro, este comportamento deve-se também ao fato do vidro ser um material impermeável, conferindo à mistura uma menor consistência e coesão, ao aumentar a quantidade de água não absorvida, aumenta também a fluidez da mistura, aumentando assim o diâmetro. Pode-se ainda observar que as misturas com maior teor de substituição de agregado natural por agregado grosso de resíduo de vidro apresentam maiores diâmetros.

Genericamente pode-se afirmar que a inserção de agregados de vidro nas misturas de betão alteram a consistência do mesmo. À primeira vista pode-se especular que, para uma mesma relação água cimento, a substituição crescente dos agregados naturais por agregados de vidro pode contribuir para uma perda de coesão da mistura, como se observa nas figuras 8 e 9, provocando a segregação das mesmas. Embora as imagens possam levar à essa conclusão, aqui pode não se tratar exatamente de segregação, pois não se constatou uma separação faseada dos componentes das misturas, mas sim a aparente aspereza da provocada pela inserção do vidro. Essa característica pode influenciar a trabalhabilidade das misturas exigindo um cuidado particular, com a inserção de maior quantidade de finos para assegurar uma dada coesão. Não obstante é importante observar se alguma influência significativa ocorre na fase do betão endurecido.

4.1.3. Determinação da massa volúmica

Depois de calculadas as massas volúmica respetivas de cada tipo de mistura e calculando-se a média por mistura representadas no seguinte gráfico:

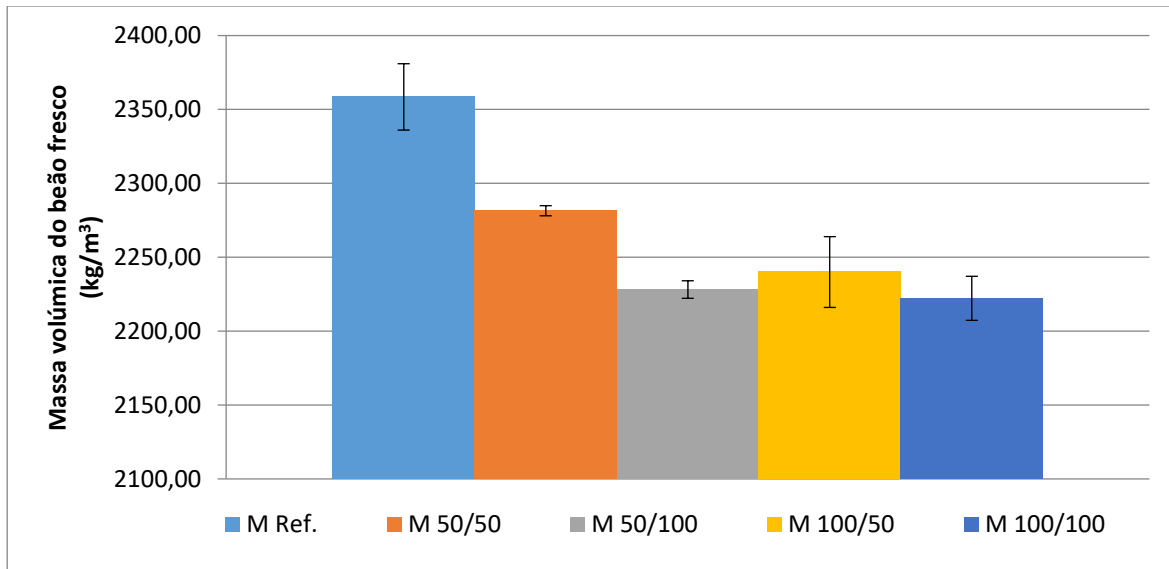


Figura 4.5. Massa volúmica média do betão fresco

À medida que aumenta a substituição de agregado por agregado de resíduo de vidro, menor se torna a massa volúmica, esta diferença deve-se ao facto de o vidro ser um material com menor densidade do que o agregado natural. O agregado grosso de vidro é o grande responsável pela diminuição da massa volúmica, pois sempre que a substituição do agregado grosso natural por agregado grosso de vidro é total, existe grande diminuição da massa volúmica.

A eventual dificuldade de compactação dos corpos de prova pode ser outro fator influente na massa volúmica, uma vez que a existência de poros diminui a densidade do betão. Embora essa hipótese seja descartada neste estudo, uma vez que o procedimento de compactação adotado foi igual para todas as misturas ou seja o betão foi compactado com o auxílio de um vibrador de agulha poderá.

4.2. Ensaios do betão endurecido

Realizaram-se os ensaios descritos no capítulo 3.6 de forma a analisar a durabilidade dos betões em estudo. Para todos os ensaios no estado endurecido do betão foram utilizados três corpos de prova para cada tipo de mistura. De modo a ilustrar os provetes usados neste estudo, recorreremos ao registo fotográfico dos provetes (Figura 19) usados no ensaio de absorção de água por capilaridade, de forma a mostrar as diferentes misturas realizadas.



Figura 4.6. Tipos de misturas

4.2.1. Determinação da massa volúmica

No estado endurecido e antes de se realizarem os ensaios de compressão foram determinadas as massas volúmicas no estado endurecido de cada mistura, resultando no seguinte gráfico com as respectivas barras de desvio padrão:

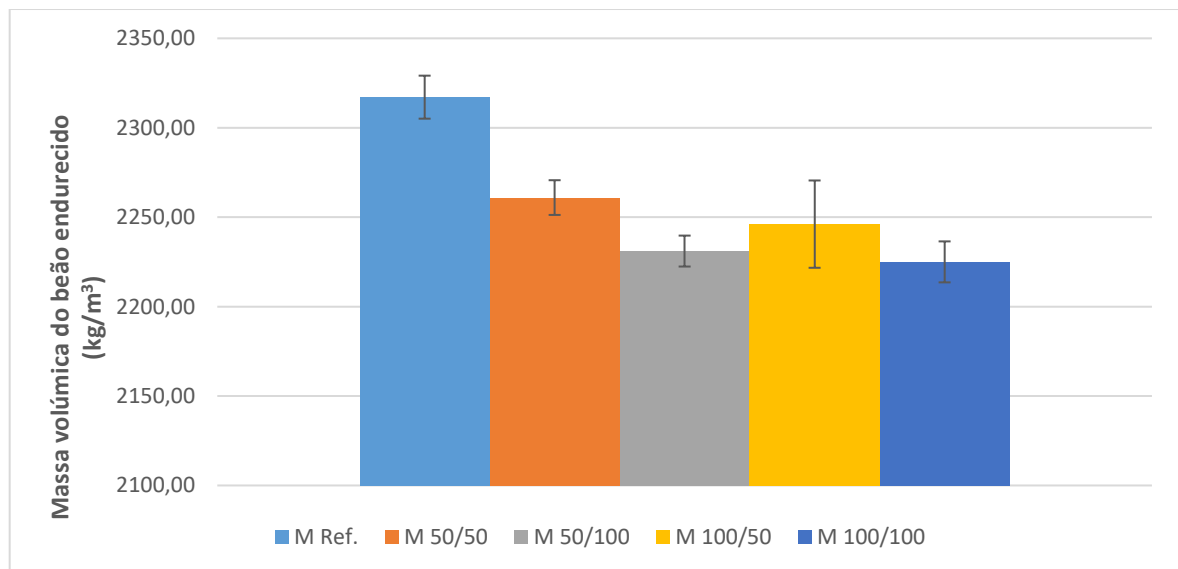


Figura 4.7. Massa volúmica média do betão endurecido

Pode-se considerar que as misturas com agregados de vidro se enquadram como betão normal, pois a sua massa volúmica após secagem em estufa (105 °C) está compreendida entre a 2000 kg/m³ a 2600 kg/m³.

Podemos ainda afirmar que o betão de referência é mais denso comparativamente às restantes misturas, devido ao facto deste ser composto apenas por agregado natural, fazendo com que o peso dos corpos de prova seja superior aos corpos de prova contendo agregado de vidro, devido à baixa densidade do vidro. Já o valor mais baixo é registado na mistura produzida por 100% de resíduos de vidro como agregado.

Como já foi referido anteriormente, a baixa densidade do agregado de vidro afeta severamente a massa volúmica dos corpos de prova, com uma percentagem de cerca de 50%, tendo uma proporção de 3,14 de agregado grosso na mistura de betão, é natural que os agregados grossos tenham grande influência no peso do betão. Todos os corpos de prova contendo agregados de vidro tiveram uma diminuição superior a 2%. Porém não há diferenças significativas entre as massas volúmicas das misturas M50/100, M100/50 e M100/100.

Comparativamente, a massa volúmica no estado fresco apresenta um valor mais elevado do que a massa volúmica no estado endurecido, este fator deve-se a evaporação de água durante o processo de cura do betão. Porém ambas massas volúmicas apresentam a mesma tendência de redução com a substituição dos agregados naturais por agregados de vidro.

4.2.2. Ensaio de ultrassom

Para a realização deste ensaio os corpos de prova foram submetidos a ondas de ultrassom, registando-se os resultados das velocidades de propagação dos impulsos, apresentando-os na Figura 4.8, cada valor apresentado é a média de três medições:

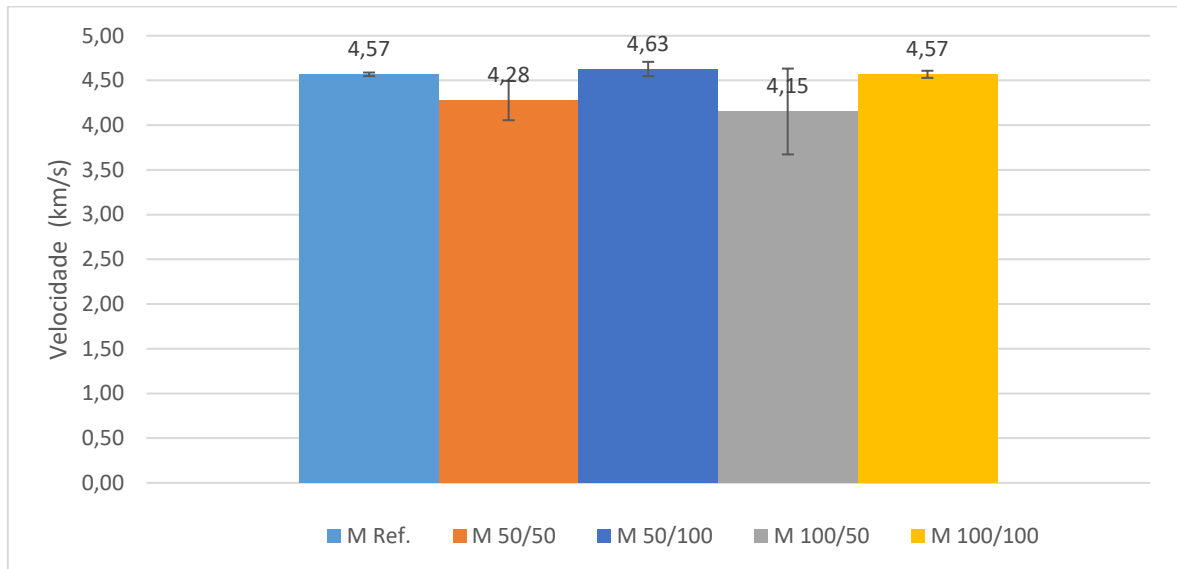


Figura 4.8. Velocidade média

Ao analisarmos o gráfico apresentado a cima, podemos verificar que a diferença entre as velocidades é relativamente pequena, variando entre 4,15 e 4,63 km/s. Essas pequenas diferenças, são por vezes anuladas pelos valores de desvios padrão. Os valores obtidos encontram-se todos a cima dos 3500 m/s, classificando-se, então, como excelentes e ótimos segundo Whitehurst (1966) e Rincon *et al.* (1998), a sua classificação apresenta-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Qualidade do betão em função da velocidade de propagação dos ultrassons. Fonte: Whitehurst (1966) e Rincon *et al* (1998)

VELOCIDADE DA ONDA ULTRA-SÔNICA (M/S)	QUALIDADE DO BETÃO
>4500	Excelente
3500 A 4500	Ótimo
3000 A 3500	Bom
2000 A 3000	Regular
<2000	Mau

Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014), obteve valores semelhantes no seu estudo “Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates” no que diz respeito a betão produzido com agregados de vidro, como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Velocidade de propagação de ultra-som do estudo de Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014).

Mix	Pulse velocity (km/s)
Control	4.75
RG-15	4.77
RG-30	4.81
RG-45	4.90
RG-60	5.10

A Figura 4.9 apresenta os resultados de módulo de elasticidade dinâmico obtidos nas misturas estudadas, e os respetivos desvios-padrão.

Os fatores básicos que afetam módulo de elasticidade dinâmico de concreto são as propriedades do agregado, pasta de cimento e as características do antimicótico, afirma Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014).

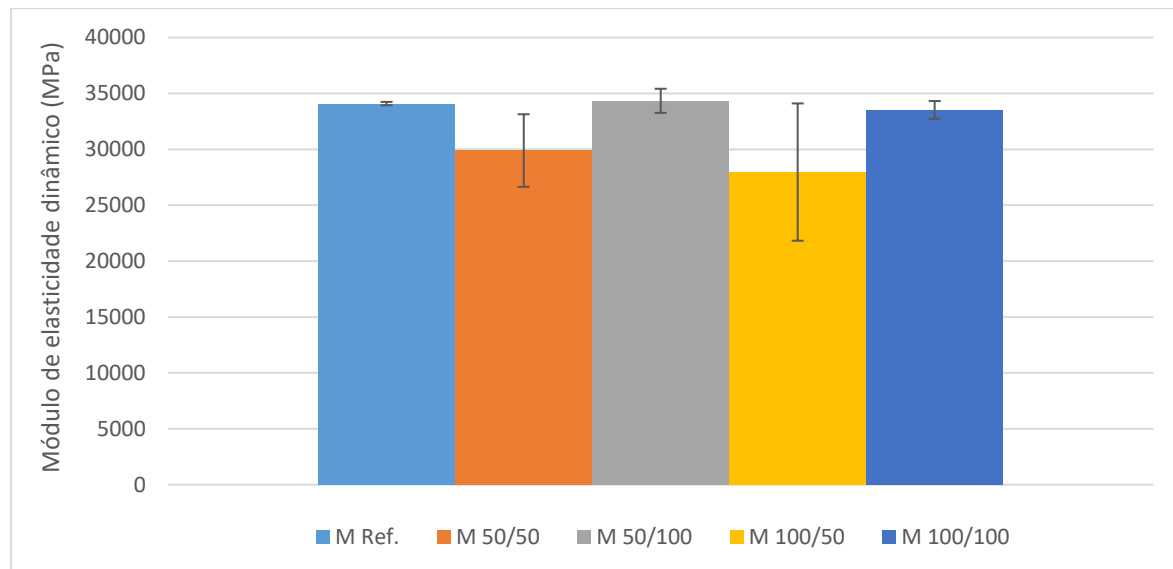


Figura 4.9. Módulo de elasticidade dinâmico

Pode-se observar que as diferenças aparentes são anuladas pelos desvios padrão. Demonstrando assim que a inserção de agregado de vidro pouco influenciou o módulo de elasticidade do betão.

4.2.3. Ensaio de compressão

Para todas as misturas foram ensaiados três corpos de prova à idade de 28 dias. Na Figura 4.10., apresentam-se os resultados médios e os respectivos desvio padrão das misturas estudadas.

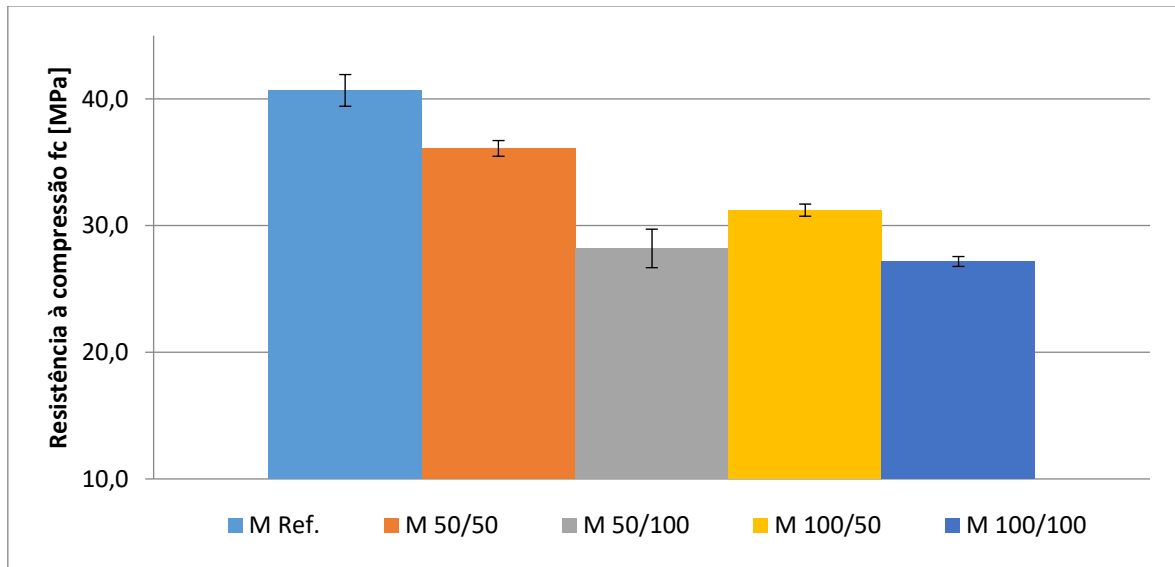


Figura 4.10. Resistência média à compressão dos diferentes tipos de misturas.

Os betões apresentam um decréscimo da resistência à compressão com a incorporação de agregados reciclados, no entanto a diferença entre misturas contendo agregados de resíduos de vidro não é muito elevada, registrando-se um decréscimo da diferença à medida que o teor de agregado fino de vidro aumenta.

Para cada teor de substituição de agregado natural por agregado de resíduos de vidro (50-50%, 50-100%, 100-50%, 100-100%) a resistência à compressão aos 28 dias diminuiu na ordem dos 11%, 31%, 23%, 33% respetivamente. Levando em conta o desvio padrão das misturas M50/100 e M100/100 verifica-se que não há diferença significativa da resistência ao aumentar o teor de agregado fino de resíduo de vidro. Não obstante, com a totalidade da substituição da areia natural e a substituição parcial do agregado grosso a resistência à compressão foi significativamente incrementada.

O vidro possui uma baixa rugosidade e porosidade o que poderá ter dificultado a ligação entre o agregado e a pasta cimentícia, tornando o betão com agregados de vidro menos resistente. O valor mais baixo, comparativamente com a mistura de referência, é registado no betão produzido com 100% de vidro como agregado.

Comparando os resultados da “Massa volúmica” e da “Resistência à compressão” verifica-se que as misturas com menor massa volúmica foram as que registaram menor resistência à compressão,

consequentemente é a que possui uma total substituição de agregado grosso. Este facto pode ser explicado pela existência de poros que tornam o betão menos susceptível a grandes cargas, ou à fraca ligação entre a massa cimentícia e os agregados grossos, pois como estes são maiores possuem uma maior área de contato com a matriz do betão, e tendo em conta a sua superfície lisa possui mais dificuldades de adesão à massa cimentícia.

4.2.4. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade permite avaliar a durabilidade do betão, pois é este o principal precursor da corrosão das armaduras, diminuindo a vida útil das estruturas, sendo de elevada importância conhecer como se processa o transporte de água nos betões estudados.

Após se proceder a análise dos resultados obtidos no ensaio de capilaridade elaborou-se o seguinte gráfico, onde se pode analisar a evolução da absorção de água por capilaridade dos corpos de prova durante as 72h. Os resultados apresentados na figura 4.11, relacionam a massa de água absorvida (g/m^2) e a raiz quadrada ao longo do tempo.

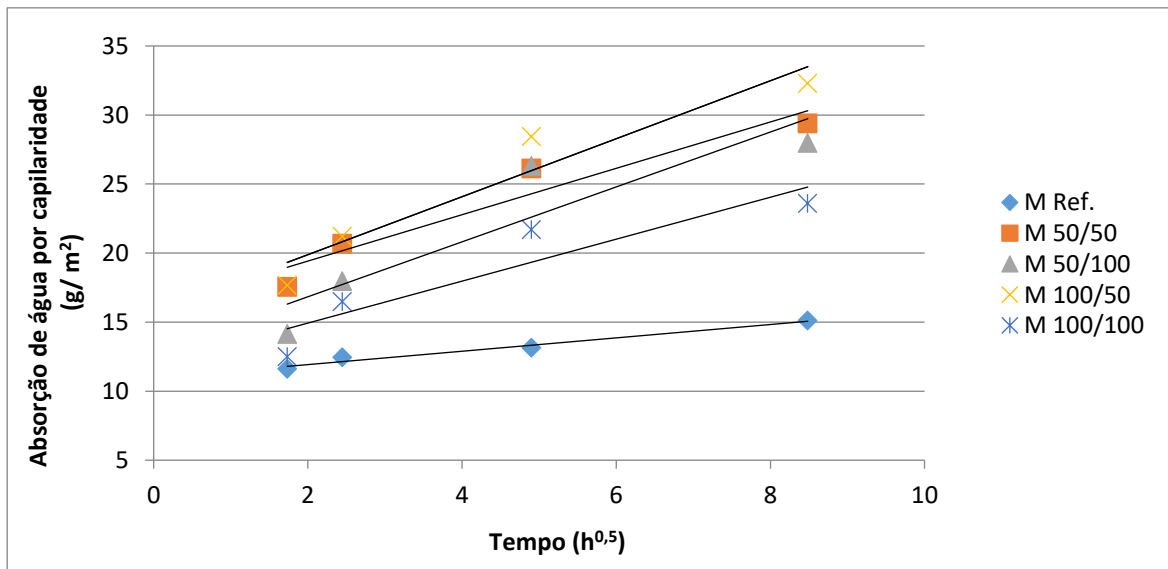


Figura 4.11. Absorção de água por capilaridade

Pode-se verificar na figura 4.11 que a mistura de referência (sem agregado de vidro) apresentou uma absorção mais baixa comparativamente às restantes misturas.

Denote-se que as misturas contendo agregado de vidro reciclado na sua composição possuem um comportamento similar, pois a porosidade da matriz do betão pouco se alterou com a os diferentes teores de vidro reciclado.

Para maior facilidade de análise do comportamento dos vários tipos de betões foram calculados os seus coeficientes de capilaridade, que exprime a velocidade de absorção de água. A Figura 4.12 apresenta os valores de coeficiente de capilaridade obtidos pela inclinação das retas obtidas com os resultados ilustrados na Figura 4.12. O coeficiente de absorção capilar resulta do declive da reta obtida por regressão linear, a reta que melhor aproxima todos os valores obtidos no estudo.

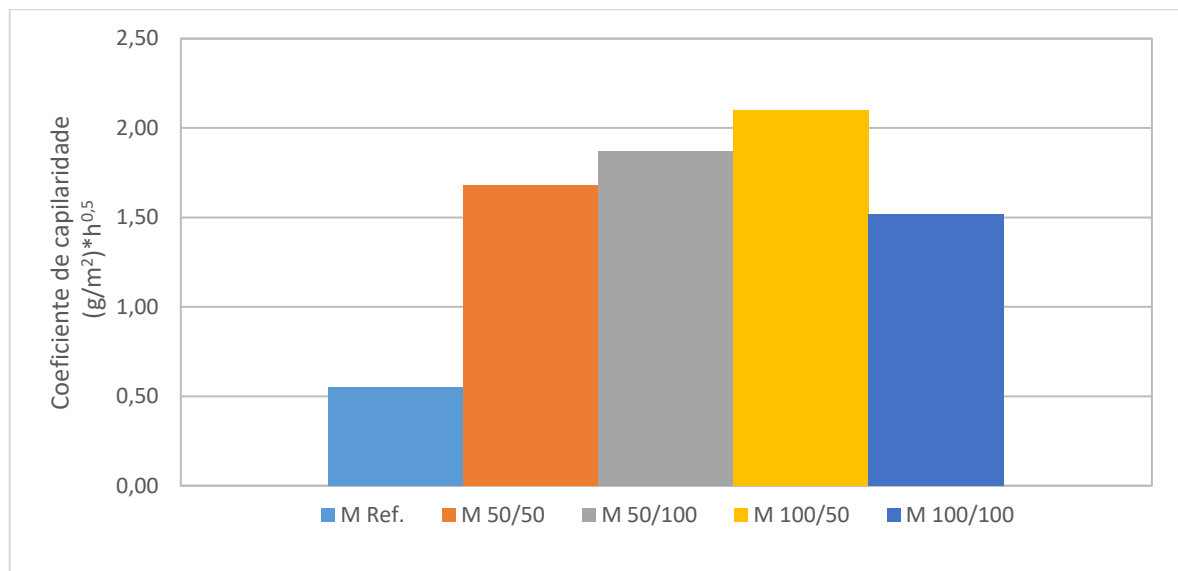


Figura 4.12. Coeficiente de capilaridade

Pode-se observar que o betão de referência possui um coeficiente de capilaridade bastante mais pequeno, fazendo com que a absorção de água seja mais lenta durante o ensaio comparativamente às misturas contendo resíduos de vidro como agregado.

Os betões produzidos com agregado de resíduo de vidro apresentam um coeficiente de capilaridade três vezes superior ao da mistura de referência. Registando-se maior valor na mistura M100/50.

Este facto pode ser explicado pela ausência de finos que seriam necessários para diminuir a porosidade das misturas com agregados de vidro e por consequência a presença de poros capilares. Veja-se que a forma (predominantemente lamelar) dos agregados de vidro têm uma forte influência na compacidade do betão.

5. Conclusões

Ao longo dos capítulos expostos foram observadas e retiradas algumas conclusões que se apresentaram relevantes para a realização e compreensão do estudo realizado.

A incorporação do vidro como agregado em misturas cimentícias é um assunto já debatido, levantando muitos estudos ao longo dos anos, sendo uma alternativa sustentável ao depósito em aterros, o uso do vidro confere propriedades mecânicas ao betão e usado de forma racional pode trazer inúmeras vantagens. Como foi dita nesse estudo, a aplicação deste tipo de material deve ser feita tendo em conta a sua tendência em reduzir o desempenho do betão face as resistências mecânicas.

No decorrer deste estudo foi analisado o comportamento de cinco misturas produzidas com cinco diferentes teores de agregado de vidro, de forma a avaliar de que forma o vidro influência as propriedades do betão, analisando assim o comportamento dos diferentes tipos de betões. Todas as misturas foram submetidas às mesmas condições climatéricas e ensaiadas conforme as normas referidas anteriormente, sendo os resultados uma média dos valores de três corpos de prova.

No que diz respeito ao estado fresco do betão, pôde-se observar uma grande diminuição da coesão nos betões com o aumento do agregado de vidro. Esse fato é explicado pela impermeabilidade do vidro, que confere a mistura uma maior fluidez, podendo facilmente se resolver com uma redução da água de amassamento e utilizando-se materiais suplementares que melhorem a viscosidade do mesmo. Neste sentido o próprio pó de vidro aparece como uma alternativa viável.

Relativamente à massa volúmica no estado fresco e endurecido, verificou-se uma ligeira diminuição com o aumento do teor de agregados de vidro, perda essa associada à baixa densidade dos agregados do resíduo de vidro, comparativamente com os valores dos agregados naturais.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade dinâmico, este não apresentou grande variação para as diferentes misturas com agregado de vidro quando comparados com os valores obtidos no betão sem incorporação de agregados de vidro, no entanto os valores enquadram-se no intervalo de valores obtidos por Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014).

Quanto a resistência à compressão do betão com agregados de vidro, verificou-se uma perda de 11%, 31%, 23% e 33% respetivamente para betões com inserção de agregados finos e grossos de vidro de 50/50%, 50/100%, 100/50% e 100/100% quando comparados com o betão sem agregados de vidro. A diminuição da resistência à compressão já era esperada, no entanto a redução de 30% em algumas misturas é um valor considerável. Estas reduções não inviabilizam de maneira nenhuma

a utilização do resíduo como agregado, porém devem ser levadas em conta quando dos estudos de dosagens de betões para atingir uma determinada resistência mecânica.

Os provetes com agregado de vidro reciclado apresentaram um coeficiente de capilaridade superior comparativamente com o betão produzido apenas com agregados naturais.

De forma geral pode-se concluir que este estudo contribuiu para compreender como a inserção de agregado de vidro em misturas cimentícias influencia o comportamento do betão. A inserção de vidro reciclado na produção de betões é uma prática viável, promove a reutilização e a valorização de um material com baixo valor. No entanto serão necessários mais estudos de forma a esclarecer algumas questões não respondidas neste estudo.

Um estudo que se veria necessário seria sobre como aumentar a resistência de betões produzidos com agregado de vidro. A recorrência à inserção de adjuvantes, adições e especificamente alguns agentes de viscosidade também de origem residual, seria aqui uma proposta.

Na mesma linha de valorização de resíduos, sugere-se a continuidade de trabalhos semelhantes, usando outros materiais resultantes também dos resíduos urbanos, de forma a dar uma nova vida a esses materiais, conservando os recursos naturais, diminuindo o volume de depósito destes em aterros, produzindo betões economicamente viáveis e com qualidade.

6. Referências Bibliográficas

- Ali e Al- Tersawy. (2012). *Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self-compacting concrete*. Construction and Building Materials. N°35. pp. 785-791.
- Alves, O. et al. (2001). *Vidros*. Cadernos Temáticos- Química Nova na Escola. Edição Especial - Fevereiro 2001
- APA (2011). *Embalagens e Resíduos de Embalagens: situação de referência 2004-2010*. Departamento de Fluxos Especiais e Mercado de Resíduos
- ASTM C618 - 15. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*
- ASTM C1260 - 14. *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates*
- Beltrão, F. e Zenaide, J. (2010). *A influência do metacaulino nas propriedades do concreto*. Belém-Pá: Universidade da Amazônia - UNAMA.
- Barros, C. (2010). *Apostila de vidros: Materiais de construção edificações*. Instituto Federal de Educação-Ciência e Tecnologia
- BS 1881-203. *Testing concrete – Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*. 1986
- Castro, S. e Brito, J. (2013). *Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates*. Journal of Cleaner Production. N°41. pp. 7-14.
- Cunha, F. e Cincontto, M. (2008). *Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Boletim Técnico
- Cota, F. et al (2015). *Mechanical properties and ASR evaluation of concrete tiles with waste glass aggregate*. Sustainable Cities and Society. N°16. (2015). pp. 49-56
- Disfani, M. et al. (2012). *Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications*. Journal of Cleaner Production. 20. pp. 170-179.
- Du, H. e Tan, K. (2014). *Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars*. Construction and Building Materials. Singapore. N°66. pp. 275-285.
- Ferreira, R. (2000). *Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Ganiron (2013). *Use of Recycled Glass Bottles as Fine Aggregates in Concrete Mixture*. International Journal of Advanced Science and Technology. Vol 61. pp. 17-28.
- Jani, Y. e Hogland, W. (2014). *Waste glass in the production of cement and concrete - A review*. Journal of Environmental Chemical Engineering. N° 2 .(2014). pp. 1767-1775

Lima et al. (2010). *Reação alcali agregado e seus efeitos na construção de edifícios*. Universidade Católica do Salvador

Lucca, A. (2010). *Reação álcali-agregado: Efeito do uso de cinza volante*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LNEC E393 - Determinação da absorção de água por capilaridade

Machado, G. Consult. 21 Mai 2016, disponível em <http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-vidro>

Machado e Sainhas. (2007) *Tecnologia de betão com adição de resíduos industriais reciclados*. Dissertação da disciplina Projetos. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014). *Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregate*. *Materials and Structures*. (2015). 48. pp. 2629-2640.

NP EN 206-1. Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Instituto Português da Qualidade. 2007

NP EN 933-1. Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica. Modo de peneiração. Instituto Português da Qualidade. 2000

NP EN 933-2. Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados – Parte 2: Determinação da distribuição granulometria. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. Instituto Português da Qualidade. 2000

NP EN 934-2. Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção – Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem. 2009

NP EN 1008. Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão. 2003

NP EN 12350-2. Testing fresh concrete – Part 2: Slump test. October 1999

NP EN 12350-3. Ensaio de betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. Instituto Português da Qualidade. Portugal. Dezembro 2001

NP EN 12350-5. Testing fresh concrete – Part 5: Flow table test. October 1999

NP EN 12350-6. Testing fresh concrete – Part 6: Density. October 1999

NP EN 12390-2. Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests. October 2000

NP EN 12390- 7. Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete. October 2000

Oliveira, L. *et al.* (2006). *Study of Sorptivity of Self-Compacting Concrete with Mineral Additives*. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol XIII. Nº3. pp. 215-220.

Oliveira, L. et al. (2008). *Avaliação de desempenho da substituição da areia natural por areia de resíduos de vidro em betões estruturais*. BE2008-Encontro Nacional Betão Estrutural

Park, S. et al. (2004). *Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate*. Cement and Concrete Research. N°34. pp. 2181-2189.

Rashad, A. (2014). *Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement*. Construction and Building Materials. N° 72 (2014). pp. 340-357.

Rincon et al. (1998). *Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion em estruturas de hormigon armado*. DURAR: Red Temática XV. B Durabilidad de la Armadura - Programa Iberoamericano de Ciência y Tecnologia para el desarrollo.

Shayan e Xu (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. Cement and Concrete Research. 34. (2004). 81-89.

Shi, C. e Zheng, K. (2007). *A Review on the Use of Waste Glasses in the Production of Cement and Concrete*. Resources Conservation & Recycling. N°52. (2007). pp. 234-247.

Santos, M. e Brito, J. (2008). *O panorama nacional das reacções álcalis-silica em betões*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria.

Santos, P. et al. (2008). *Comportamento mecânico e durabilidade de betões com areia de resíduos de vidro*. Covilhã: Universidade da Beira Interior.

Serpa, D. et al. (2012). Comportamento do vidro reciclado em materiais cimentícios. Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS´12, 20 a 22 de Setembro, em Aveiro.

Serpa, D. et al. (2012). Betão produzido com agregado de vidro reciclado: desempenho mecânico. Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS´12, 20 a 22 de Setembro, em Aveiro.

Silva, A. (2009). *Durabilidade do betão. Mitigação das reacções expansivas internas*. Construção Magazine. N° 31. pp. 16-20.

Silva, A. et al. (2010). *Reacções expansivas internas no betão: mitigação da expansão pelo emprego de adições minerais*. Lisboa: Encontro Nacional Betão Estrutural

Taha, B. e Nounu, G. (2007). *Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement*. Construction and Building Materials

Terro, M. (2005). *Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures*. Building and Environment. 41. 2006. pp. 633-639.

Topçu, I. e Canbaz, M. (2003) *Properties of concrete containing waste glass*. Cement and concrete research. N°34. (2004) pp. 267-274.

Topcu I. et al. (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 Manage. 28. pp. 878-84.

Whitehurst, E. (1966). *Evaluation of concrete properties from sonic tests*. Detroit: American Concrete Institute.

7. Anexos

- I. Resultados do ensaio de tronco de cone - Slump test
- II. Ensaio da mesa de espalhamento - mesa de Graff
- III. Determinação da massa vólumica no estado fresco
- IV. Determinação da massa vólumica no estado endurecido
- V. Valores Obtidos no Ensaio de Compressão
 - I. Valores do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade
- VI. Ensaio de ultra som - Modulo de elasticidade dinâmico Ed

II. Ensaio do tronco de cone (Slump Test)

Tipo de mistura	diametros máximos (cm)		
	d1	d2	média
Mistura ref.	37,4	38,9	38,15
M 50/50	50,5	50,8	50,65
M 50/100	50,8	58	54,4
M 100/50	53	52,3	52,65
M 100/100	53	52,3	52,65

III. Ensaio da mesa de espalhamento (mesa de Graff)

Tipo de mistura	Abaixamento (cm)
Mistura ref.	0,15
M 50/50	15
M 50/100	17
M 100/50	20,5
M 100/100	18,5

IV. Determinação da massa volúmica no estado fresco

Tipo de Mistura	Corpos de prova	peso s/	peso c/	volume do molde	Massa Vólumica	Massa vólumica média	Desvio padrão
Mistura ref.	1	1,28	9,24	0,003375	2358,519	2358,22	22,44
	2	1,28	9,26	0,003375	2364,444		
	3	1,28	9,12	0,003375	2322,963		
M 50/50	1	1,28	8,98	0,003375	2281,481	2281,48	3,42
	2	1,28	8,98	0,003375	2281,481		
	3	1,28	9	0,003375	2287,407		
M 50/100	1	1,3	8,8	0,003375	2222,222	2228,15	5,93
	2	1,3	8,84	0,003375	2234,074		
	3	1,3	8,82	0,003375	2228,148		
M 100/50	1	1,28	8,9	0,003375	2257,778	2240,00	23,95
	2	1,32	8,88	0,003375	2240		
	3	1,32	8,78	0,003375	2210,37		
M 100/100	1	1,28	8,72	0,003375	2204,444	2222,22	14,91
	2	1,28	8,78	0,003375	2222,222		
	3	1,28	8,82	0,003375	2234,074		

V. Determinação da massa volúmica no estado endurecido

mistura	Corpos de prova	lado	lado	altura	peso	massa volumica	Massa vólumica média	desvio padrao
Mistura Ref.	1	14,95	14,95	15,00	7,82	2332,56	2317,11	12,02
	2	14,95	14,95	15,10	7,82	2317,11		
	3	14,95	14,95	14,96	7,72	2308,89		
M 50/50	1	14,95	14,95	15,00	7,58	2260,97	2260,97	9,71
	2	14,95	14,95	14,85	7,56	2277,79		
	3	14,95	14,95	15,00	7,58	2260,97		
M 50/100	1	14,95	14,95	14,90	7,38	2216,09	2231,07	8,65
	2	14,95	14,95	14,84	7,40	2231,08		
	3	14,95	14,95	14,80	7,38	2231,07		
M 100/50	1	14,95	14,95	14,90	7,48	2246,12	2246,12	24,41
	2	14,95	14,95	14,80	7,44	2249,20		
	3	14,95	14,95	14,85	7,32	2205,48		
M 100/100	1	14,95	14,95	14,60	7,32	2243,24	2225,02	11,46
	2	14,95	14,95	14,80	7,36	2225,02		
	3	14,95	14,95	14,90	7,40	2222,10		

VII. Valores Obtidos no Ensaio de Compressão

tipo de mistura	Corpos de prova	Carga (kN)	f _c [Mpa]	f _c médio [Mpa]	desvio padrão
Mistura Ref.	1	886,3	39,4	40,7	1,25
	2	942,5	41,9		
	3	916,6	40,7		
M 50/50	1	810	36,0	36,1	0,62
	2	799,3	35,5		
	3	826,9	36,8		
M 50/100	1	621,8	27,6	28,2	1,52
	2	608,3	27,0		
	3	673,3	29,9		
M 100/50	1	712,4	31,7	31,2	0,48
	2	704,2	31,3		
	3	690,8	30,7		
M 100/100	1	602,9	26,8	27,2	0,39
	2	610,5	27,1		
	3	620,4	27,6		

VI. Valores do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

Tipo de mistura	corpos de prova	tempo				
		0h	3h	6h	24h	72h
Mistura Ref.	1	1633,2	1639,5	1639,8	1640,4	1641,5
	2	1683,2	1690,5	1691,3	1691,5	1693
	3	1704,3	1706,3	1706,6	1707	1707,7
M 50/50	1	1543,4	1554,8	1556,7	1560,1	1561,7
	2	1461,4	1471,5	1473,4	1476,6	1478,4
	3	1425,3	1433,4	1434,9	1437,5	1439,6
M 50/100	1	1727,3	1735,5	1736,9	1740	1741,5
	2	1736,1	1738,7	1745,3	1752,7	1751,6
	3	1668,8	1676,5	1678,3	1681,9	1684,3
M 100/50	1	1729	1738,5	1740,3	1744,3	1746,9
	2	1716,3	1726,5	1728,4	1732,8	1734,6
	3	1822,4	1832,5	1834,8	1838,6	1840,7
M 100/100	1	1814,8	1823,3	1825,2	1828,4	1829,7
	2	1665,2	1672,1	1673,7	1676,4	1677,5
	3	1692,7	1698,4	1701,6	1704,5	1705,3

quantidade de água absorvida					
Tipo de mistura	corpos de prova	tempo (h)			
		0-3h	0-6h	0-24h	0-72h
Mistura Ref.	1	11,200	11,733	12,800	14,756
	2	12,978	14,400	14,756	17,422
	3	3,556	4,089	4,800	6,044
M 50/50	1	20,267	23,644	29,689	32,533
	2	17,956	21,333	27,022	30,222
	3	14,400	17,067	21,689	25,422
M 50/100	1	14,578	17,067	22,578	25,244
	2		16,356	29,511	27,556
	3	13,689	16,889	23,289	27,556
M 100/50	1	16,889	20,089	27,200	31,822
	2	18,133	21,511	29,333	32,533
	3	17,956	22,044	28,800	32,533
M 100/100	1	15,111	18,489	24,178	26,489
	2	12,267	15,111	19,911	21,867
	3	10,133	15,822	20,978	22,400

Quantidade média de água absorvida				
Tipo de mistura	Tempo (h) e tempo $h^{0,5}$			
	3	6	24	72
		1,73	2,45	4,90
M referência	12,09	13,07	13,78	16,09
M 50/50	17,54	20,68	26,13	29,39
M 50/100	14,13	16,77	25,13	26,79
M 100/50	17,66	21,21	28,44	32,30
M 100/100	12,50	16,47	21,69	23,59

VII. Ensaio de ultra som - Modulo de elasticidade dinâmico Ed

Tipo de Mistura	corpo de prova	lado a	lado b	media	ρ (Kg/m ³)	L (mm)	V (Km/s)	V media (Km/s)	ν (Coef. de Poisson)	Ed (MPa)	Edm (MPa)	Sd (MPa)
M Ref.	1	34,50	32,20	33,35	2332,56	150,00	4,50	4,52	0,20	33974,56	34090,89	150,83
	2	34,40	31,80	33,10	2317,11	150,00	4,53		0,20	34261,31		
	3	33,70	32,60	33,15	2308,89	150,00	4,52		0,20	34036,80		
M 50/50	1	35,50	34,60	35,05	2260,97	150,00	4,28	4,28	0,20	29814,78	29891,43	3247,66
	2	33,60	33,10	33,35	2277,79	150,00	4,50		0,20	33176,74		
	3	37,40	36,70	37,05	2260,97	150,00	4,05		0,20	26682,77		
M 50/100	1	32,70	31,40	32,05	2216,09	150,00	4,68	4,63	0,20	34949,76	34335,41	1079,59
	2	30,50	33,80	32,15	2231,08	150,00	4,67		0,20	34967,61		
	3	33,30	32,80	33,05	2231,07	150,00	4,54		0,20	33088,85		
M 100/50	1	31,90	34,70	33,30	2246,12	150,00	4,50	4,15	0,20	32813,82	27962,11	6143,04
	2	41,50	41,70	41,60	2249,20	150,00	3,61		0,20	21054,89		
	3	35,60	33,40	34,50	2205,48	150,00	4,35		0,20	30017,61		
M 100/100	1	31,90	33,10	32,50	2243,24	150,00	4,62	4,57	0,20	34405,00	33520,71	797,40
	2	33,00	32,80	32,90	2225,02	150,00	4,56		0,20	33300,77		
	3	33,70	32,50	33,10	2222,10	150,00	4,53		0,20	32856,36		

