



Relatório de Estágio

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***Valorização de um resíduo resultante da reciclagem
de vidro, por incorporação no fabrico de betão***

Elisa Cristiana da Silva Fajardo

Leiria, Novembro de 2013



Relatório de Estágio

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***Valorização de um resíduo resultante da reciclagem
de vidro, por incorporação no fabrico de betão***

Elisa Cristiana da Silva Fajardo

Relatório de estágio no âmbito de Mestrado realizado sob a orientação da Doutora Sandra Jesus Martins Mourato, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, coorientação do Doutor Paulo Alexandre Lopes Fernandes, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e supervisão do Engenheiro Paulo Roque, Diretor Geral da empresa Vidrociclo da Figueira da Foz

Leiria, *Novembro* de 2013

Aos meus pais,
como expressão da minha enorme gratidão

“(...) Sabemos isto: a terra não pertence ao homem,
é o homem que pertence à terra... Há uma ligação em tudo.
O que ocorrer com a terra recairá sobre os filhos da terra. (...)”

Excerto da carta escrita, em 1854, pelo chefe Seattle ao presidente dos EUA,
Franklin Pierce, quando propôs comprar grande parte das terras da sua tribo.

Agradecimentos

Ao Engenheiro Paulo Roque por me proporcionar a grandiosa oportunidade de estagiar na Vidrociclo. Por toda a compreensão, apoio e paciência no decorrer deste projeto. Por todas as explicações e ensinamentos dados, e por toda a disponibilidade prestada.

À minha orientadora, Professora Doutora Sandra Mourato, pela excelente orientação que me deu, pela análise crítica, recomendações e encorajamento. Pela sua enorme dedicação, entusiasmo e disponibilidade.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Paulo Fernandes, pela orientação na parte mais científica e experimental do trabalho. Pelos ensinamentos acerca de um assunto sobre o qual eu não tinha formação, e pela simpática compreensão relativamente à minha ignorância em matérias do domínio da Engenharia Civil.

Ao Professor Doutor Nelson Oliveira, coordenador do Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, por me ter mencionado a oportunidade de estagiar na Vidrociclo.

À Professora Doutora Sílvia Santos pela ajuda no planeamento das análises de lixiviação das águas e pelo esclarecimento de todas as minhas dúvidas neste campo.

À Engenheira Vânia Marques, técnica do Laboratório de Estruturas e Betão Armado da ESTG, pelo incansável apoio em todas as fases do trabalho experimental, desde as análises granulométricas à produção dos betões e posteriores testes de resistência à compressão.

À Engenheira Kátia Nuelma, técnica do Laboratório Instrumental da ESTG, pela disponibilidade e apoio prestado durante a realização das análises de lixiviação.

À Secil (fábrica Maceira-Liz) pelo fornecimento do cimento necessário para o decorrer deste projeto.

À Sika pelo fornecimento do adjuvante utilizado na preparação dos provetes de betão.

À Escola Superior de Tecnologias e Gestão pela disponibilidade dos laboratórios e dos materiais necessários ao longo dos trabalhos experimentais.

Aos funcionários da Vidrociclo, por me terem todos recebido muito bem e pela enorme simpatia. Em especial ao Sr. Oliveira, técnico responsável pela manutenção na fábrica, que dispensou grande parte do seu tempo a mostrar-me a instalação fabril e a explicar-me detalhadamente todo o processo produtivo e tecnologias da mesma. Agradeço também aos técnicos do laboratório existente na empresa, os quais sempre me auxiliaram quando eu ia analisar o produto final da fábrica.

Ao meu namorado pela paciência, carinho, apoio, encorajamento, e por sempre me ajudar a pensar positivamente.

Aos meus amigos mais chegados e familiares, que de uma forma ou de outra sempre me encorajaram e apoiaram.

Aos meus pais, por todo o apoio, compreensão, conselhos, esforços e sacrifícios suportados, e por toda a coragem e incentivo que sempre me incumbiram. Em especial à minha mãe, que mesmo passando por uma fase de saúde menos boa, sempre me apoiou e deu força, mesmo quando era ela quem mais precisava de apoio.

A todos presto o meu enorme reconhecimento e um profundo obrigado!

Resumo

A componente ambiental é cada vez mais equacionada no mundo empresarial, surgindo assim diversos conceitos entre eles, o desenvolvimento sustentável. Este conceito surge numa perspectiva de combater alguns problemas ambientais da nossa sociedade, dentro dos quais, a grande produção de resíduos e o consumo excessivo dos recursos naturais. É neste contexto que surge o presente estudo sendo que, teve como objetivo estudar a possibilidade de reaproveitamento de resíduos de vidro, provenientes de uma indústria de reciclagem de vidro, a Vidrociclo, localizada na Figueira da Foz.

Uma vez que, a indústria de cimento e betão é uma das principais consumidoras de recursos naturais e, conseqüentemente, uma das grandes fontes de CO₂ para a atmosfera, neste trabalho estudou-se a possibilidade de incorporar os resíduos em estudo, em betão, como substituição parcial do cimento. Procedeu-se à produção de provetes de betão com três percentagens de substituição de cimento por resíduo, 5%, 10% e 15%, e testou-se a sua resistência à compressão aos 7, 28 e 84 dias. Efetuaram-se também análises de lixiviação de metais à água de cura dos provetes.

Os betões com adição de vidro revelaram resistências à compressão inferiores ao betão de referência, sendo que essa perda de resistência aumenta com a adição. No entanto, essa perda de resistência é pouco significativa pelo que se considera que o resíduo pode ser usado em betão, como substituto parcial de cimento. As análises de lixiviação demonstraram que não houve lixiviação nem de metais para a água de cura.

Palavras-chave: *vidro, betão, reciclagem, reação álcalis-agregado, compressão, lixiviação*

Abstract

The environmental component is increasingly taken into account in the business world, giving rise to various concepts including sustainable development. This concept arises from a perspective of tackling some environmental problems of our society, such as the waste production and the overconsumption of natural resources. It is in this context that the present study is inserted, with the purpose of studying the possibility of reusing waste glass from a glass recycling industry, the Vidrociclo located in Figueira da Foz.

Once the cement and concrete industry is one of the biggest consumer of natural resources and consequently, one of the biggest sources of CO₂ to the atmosphere, this work examines the possibility of incorporate the waste glass as partial cement replacement in concrete. Glass powder was used in three percentage of cement replacement: 5%, 10% and 15%, and tested for its compressive strength at 7, 28 and 84 days. It was analyzed also metal leaching in the curing water.

The concrete with waste glass showed compressive strengths below the reference concrete, and this loss resistance increases with adding. However, this loss of strength is insignificant therefore it is considered that the waste can be used in concrete as a partial replacement of cement. The leaching tests showed no leaching of metals on cure water.

Key-Words: glass, concrete, recycling, alkali-aggregate reaction, compression, leaching

Índice de Figuras

Figura 1: Representação esquemática de um tetraedro de SiO_4^{4-}	14
Figura 2: Representação esquemática de: (a) Sílica cristalina (b) Vidro de sílica pura (Sílica vítrea).....	15
Figura 3: Vidro de rede modificada.	16
Figura 4: Ciclo infinito da reciclagem do vidro.....	22
Figura 5: (a) Defeito na superfície devido a uma partícula metálica; (b) Defeito causado por contaminação de cerâmica	26
Figura 6: Esquema de silos de entrada.....	38
Figura 7: Esquema do funcionamento de um magnético rotativo.	39
Figura 8: Esquema do funcionamento de um ciclone.....	40
Figura 9: Esquema representativo de um britador/ moinho de rolos.....	41
Figura 10: Funcionamento de uma máquina de corrente induzida.....	42
Figura 11: Esquema ilustrativo do funcionamento das máquinas de escolha ótica.....	42
Figura 12: Esquematisação da superfície da sílica: a) não hidratada; b) hidratada	55
Figura 13: Sequência da reação álcalis-agregado	56
Figura 14: Esquematisação da composição das diferentes misturas ensaiadas.....	69
Figura 15: Silos: a) Parte frontal dos silos; b) Parte traseira dos silos.....	93
Figura 16: Magnético	93
Figura 17: Ciclones	94
Figura 18: Escolha manual.....	94
Figura 19: Crivos: a) Crivo de dedos; b) Crivo de telas	94
Figura 20: Máquinas de escolha ótica.....	95
Figura 21: Equipamento de corrente induzida	95

Figura 22: Resíduos resultantes do processo de reciclagem do vidro: a) Resíduos leves (papéis, plásticos, etc.); b) Resíduos ferrosos; c) Resíduo das máquinas óticas (resíduo em estudo neste projeto).....	95
Figura 23: Resíduo utilizado.....	96
Figura 24: Agregados utilizados: a) Areia fina; b) Brita fina; c) Brita grossa.....	96
Figura 25: Crivagem de material: a) Máquina de vibração e crivos; b) Crivagem manual complementar à mecânica.....	96
Figura 26: Produção dos betões: a) Adição de brita; b) Adição de areia; c) Mistura de agregados; d) Adição de cimento; e) Adição de água; f) Adição de vidro.....	97
Figura 27: Moldagem dos cubos de betão.....	98
Figura 28: Desmoldagem dos cubos de betão.....	98
Figura 29: Cura dos betões: a) Tuba de água de cura; b) Provetes de betão submersos na água de cura.....	99
Figura 30: Equipamento utilizado para a execução dos ensaios de resistência à compressão dos betões.....	99
Figura 31: Execução dos ensaios de resistência à compressão: a) Colocação do provete no equipamento; b) Provelte a começar a ceder às forças efetuadas pelo equipamento.....	100
Figura 32: Provetes de betão: a) Provelte de betão antes do ensaio de resistência à compressão; b) Provelte de betão após o ensaio de resistência à compressão.....	100
Figura 33: Preparação dos padrões utilizados para a preparação das curvas de calibração: a) Pipetamento dos padrões; b) Perfazimento dos padrões com água destilada.....	101
Figura 34: Padrões utilizados para a preparação das curvas de calibração dos metais....	101
Figura 35: Equipamento usado para a filtragem das amostras.....	101
Figura 36: Filtragem das amostras de água.....	102
Figura 37: Amostras de água prontas a serem analisadas no espectrofotómetro de absorção atómica por chama.....	102
Figura 38: Espectrofotometria: a) Espectrofotómetro de absorção atómica por chama utilizado; b) Análise realizada a uma das amostras.....	102

Índice de Tabelas

Tabela 1: Características químicas do cimento utilizado (CEM I 42,5 R).....	64
Tabela 2: Características mecânicas do cimento utilizado (CEM I 42,5 R).....	64
Tabela 3: Análise granulométrica do resíduo de vidro utilizado.....	65
Tabela 4: Análise granulométrica da areia utilizada.	66
Tabela 5: Curva granulométrica da brita fina utilizada.	67
Tabela 6: Curva granulométrica da brita grossa utilizada.....	67
Tabela 7: Composição dos provetes de betão.	69
Tabela 8: Valores de concentração (mg/L) de cada metal em estudo para as diferentes amostras de água de cura do betão analisadas.....	77
Tabela 9: Resumo dos AAS da Vidrociclo.	87
Tabela 10: Comparação das características do vidro comum com a crosta terrestre.	88
Tabela 11: Composição química de vidros comercializados.	88
Tabela 12: Análise Química do resíduo das máquinas óticas, feita em Novembro de 2012 pelo laboratório alemão IGR Institut für Glas- und Rohstofftechnologie GmbH.....	89

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Setores da indústria de fabricação de vidro, e suas contribuições percentuais para o volume total de produção (2007).....	21
Gráfico 2: Curva granulométrica do resíduo de vidro utilizado.....	65
Gráfico 3: Curva granulométrica da areia fina utilizada.....	66
Gráfico 4: Curva granulométrica da brita fina utilizada.....	67
Gráfico 5: Curva granulométrica da brita grossa utilizada.....	68
Gráfico 6: Resistências à compressão aos 7, 28 e 84 dias, para os provetes com 0% de... 73	
Gráfico 7: Resistências à compressão aos 7, 28 e 84 dias, para os provetes com 5% de adição de resíduo.....	74
Gráfico 8: Resistências à compressão aos 7, 28 e 84 dias, para os provetes com 10% de adição de resíduo.....	74
Gráfico 9: Resistências à compressão aos 7, 28 e 84 dias, para os provetes com 15% de adição de resíduo.....	75
Gráfico 10: Valores médios de resistência à compressão aos 7, 28 e 84 dias, obtidos para as diferentes percentagens de adição de resíduo.....	75
Gráfico 11: Função entre cada valor de resistência médio para cada idade e o valor médio aos 28 dias.....	77
Gráfico 12: Valores de produção anual na Vidrociclo desde 2009, expressos em ton/ano.....	90

Lista de Siglas

% - Percentagem

AAS - Aspetos Ambientais Significativos

a.C. – Antes de Cristo

Al₂O₃ - Óxido de alumínio

B₂O₃ - Trióxido de boro

° C – Graus Centígrados

2CaO.SiO₂ - Silicato bicálcico

3CaO.Al₂O₃ - Aluminato tricálcico

3CaO.SiO₂ - Silicato tricálcico

4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ - Aluminoferrato tetracálcico

CaO - Óxido de cálcio

Ca(OH)₂ - Hidróxido de cálcio

CEM – Cimento que esteja de acordo com a norma EN 197-1

cm – Centímetro

CO₂ – Dióxido de Carbono

CoO – Óxido de cobalto (II)

CPS – Sigla inglesa de *ceramic, porcelain and stones* (em português: cerâmicas, porcelanas e pedras)

CQO – Carência Química de Oxigénio

CRT – Sigla inglesa de *Cathodic Ray Tube* (em português: Tubo de raios catódicos)

CuO – Óxido de cobre (II)

d.C. – Depois de Cristo

Fe₂O₃ – Óxido de ferro (III)

GAR – Guia de acompanhamento de resíduos

GEE – Gás com Efeito de Estufa

HNO₃ – Ácido nítrico
K₂O – Óxido de potássio
kg – Quilograma
LCD – Sigla inglesa de *liquid crystal display* (em português: monitor de cristal líquido)
L.D. – Limite de Detecção
LOI – Sigla inglesa de *Lost of ignition* (em português: perda de ignição)
m³ – Metro cúbico
MgO - Óxido de magnésio
Na₂O - Óxido de sódio
Na₂O_{eq} - Óxido de sódio equivalente
NaCl – cloreto de sódio
Na₂SO₄ sulfato de sódio
NO_x – Óxidos de azoto
OH⁻ - ião hidroxilo
PbO – Óxido de chumbo
Pb₃O₄ – Tetróxido de chumbo
ppm – Partes por milhão
RAA - Reação álcalis-agregado
RAS – Reação álcalis-sílica
RASS – Reação álcalis-silicato
RAC – Reação álcalis-carbonato
RCD – Resíduos de construção e demolição
RSU – Resíduos sólidos urbanos
SiO₂ – Dióxido de silício, mais vulgarmente conhecido como *silica*
SO_x – Óxidos de enxofre
ton – Toneladas
UO₂ - Óxido de urânio (IV)

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XV
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XVII
LISTA DE SIGLAS	XIX
ÍNDICE.....	XXI
INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. OBJETIVOS DO RELATÓRIO	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. EMPRESA.....	5
2.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA.....	5
2.2. SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL DA EMPRESA.....	6
3. REVISÃO DOS CONHECIMENTOS.....	9
3.1. O MATERIAL VIDRO	9
3.1.1. Origem do vidro	9
3.1.2. História da indústria vidreira em Portugal.....	11
3.1.3. Definição de vidro	12
3.1.4. Características do vidro	12
3.1.5. Estrutura química do vidro	14
3.1.6. Constituição do vidro.....	16
3.1.7. Tipos de vidro	17
3.2. RECICLAGEM DO VIDRO	21
3.2.1. Vantagens da reciclagem do vidro.....	23
3.2.2. Resíduos de vidro para reciclagem: casco.....	24

3.3.	BETÃO.....	28
3.3.1.	Definição.....	28
3.3.2.	Componentes do betão.....	28
3.3.3.	Pozolanas em betão.....	33
3.3.4.	Reatividade pozolânica.....	35
4.	CASO DE ESTUDO.....	37
4.1.	TECNOLOGIAS DA VIDROCICLO.....	37
4.2.	PROCESSO PRODUTIVO DA RECICLAGEM DE VIDRO NA VIDROCICLO.....	44
4.3.	VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DAS MÁQUINAS ÓTICAS.....	47
4.3.1.	Caracterização do resíduo.....	47
4.3.2.	Alternativas possíveis à deposição em aterro.....	47
5.	METODOLOGIA.....	49
5.1.	INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDRO EM BETÃO.....	49
5.1.1.	Como agregado em betão.....	50
5.1.2.	Como matéria-prima para produção de cimento.....	51
5.1.3.	Como substituição parcial de cimento em betão.....	51
5.2.	REAÇÃO ÁLCALIS – AGREGADO.....	54
5.2.1.	Tipos de reação álcalis-agregado.....	54
5.2.2.	Fatores que influenciam a RAA.....	58
5.2.3.	Processos para mitigar a RAA.....	62
5.3.	TRABALHO EXPERIMENTAL.....	64
5.3.1.	Caracterização dos constituintes.....	64
5.3.2.	Misturas ensaiadas.....	68
5.3.3.	Ensaio realizados.....	70
6.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	73
6.1.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	73
6.2.	ANÁLISES DE LIXIVIAÇÃO.....	77
7.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	79
8.	BIBLIOGRAFIA.....	81
8.1.	LIVROS/ DISSERTAÇÕES/ TEXTOS/ ARTIGOS/ APRESENTAÇÕES.....	81
8.2.	LEGISLAÇÃO / NORMAS / ESPECIFICAÇÕES DE ENSAIO.....	86
	ANEXO I.....	87
	ANEXO II.....	91
	II.1. POLÍTICA DA QUALIDADE, AMBIENTE E SEGURANÇA.....	91
	ANEXO III.....	93

III.1. TECNOLOGIAS DA VIDROCICLO	93
III.2. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS.....	96
III.3. PRODUÇÃO DOS BETÕES.....	97
III.4. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	99
III.5. ANÁLISES DE LIXIVIAÇÃO	101
ANEXO IV	103
IV.1. COMPOSIÇÕES TESTADAS PARA A DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO BASE.....	103
IV.2. RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO	109
IV.3. FICHA TÉCNICA DO CIMENTO UTILIZADO.....	123
IV.4. FICHA TÉCNICA DO SUPERPLASTIFICANTE UTILIZADO	127

Introdução

1.1. Considerações gerais

A crise ambiental que atualmente atravessamos é, de dia para dia, cada vez mais notória. Um ano mais seco, chuvas torrenciais algures num canto do mundo, mais um furacão aqui e um terramoto acolá, glaciares que recuam, icebergs que derretem, florestas que ardem e espécies que se extinguem. E tudo isto é, essencialmente, provocado pelo Homem que, cada vez mais passa de espécie ameaçadora a espécie, também ela, ameaçada. É do conhecimento geral que, o aquecimento global é a maior consequência dos erros ambientais cometidos pela humanidade, sendo que o CO₂ é o principal gás com efeito de estufa (GEE) que desencadeia esta preocupação ambiental.

Dois outros grandes problemas ambientais e ecológicos com que o Homem se tem deparado na atualidade, são a grande produção de resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) e o consumo excessivo, com o conseqüente esgotamento, dos recursos naturais.

Encontrar soluções adequadas para a deposição final dos resíduos provenientes das diversas indústrias, representa um grande desafio para o meio científico e tecnológico, tendo em vista os graves problemas ambientais que podem ser gerados por uma disposição inadequada (Silva *et al*, 2011).

A evolução da humanidade tem proporcionado uma evolução tecnológica sem precedentes, proporcionando uma cada vez maior qualidade de vida e conforto. Essa evolução, adicionada ao enorme crescimento populacional que se tem verificado, tem levado a um consumo incessante e desmesurado dos recursos proporcionados pela natureza. Esta situação tem-se revelado insustentável uma vez que, os recursos naturais não são ilimitados e a velocidade de extração tem sido muito superior à sua reposição natural, levando a uma decadência abrupta da quantidade de recursos naturais disponíveis. Como tal, tem-se verificado nos últimos anos, a prática da reciclagem de diversos materiais assim como, um reforço prático dos conceitos de reduzir e reutilizar.

Um outro conceito que surge e tem ganho grande destaque nas últimas décadas, é o conceito de “Ecologia Industrial”. De acordo com Mehta *et al* (2006) e citado por Coutinho (2011), a ecologia industrial implica reciclar os resíduos produzidos por uma indústria, para que substituam matérias-primas necessárias a outras indústrias reduzindo assim, o impacto ambiental de ambas. Deste modo, uma grande parte dos resíduos gerados pode passar a ter valor comercial se forem tratados devidamente, passando assim, de resíduos a matérias-primas.

A indústria da construção civil, devido à sua importância e dimensão, é fundamental para a concretização do objetivo do desenvolvimento sustentável. Este facto torna-se ainda mais relevante, visto que a indústria da construção é muitas vezes apontada como uma das principais causadoras de poluição e consumo de recursos naturais.

Este setor produtivo passa atualmente por um processo de transformação, onde tenta adequar-se aos padrões de desenvolvimento sustentável requeridos na atualidade. Uma das medidas para alcançar essa sustentabilidade, passa por aplicar o conceito de ecologia industrial acima referido. Deste modo, é importante investigar a aplicação de resíduos e subprodutos com potencial de aplicação, sobretudo em betão. Contudo, de acordo com Brito (2004) e citado por Oliveira (2012), convém ter presente que a sustentabilidade não apresenta apenas uma dimensão ambiental, sendo que também a dimensão económica e social devem ocorrer em simultâneo com aquela, dado que não é aceitável que uma ocorra em prejuízo das outras.

O material mais utilizado pela construção civil é, sem dúvida, o betão, pelo que facilmente se conclui que qualquer esforço que possa ser feito no sentido de reduzir os impactos da indústria do betão, se traduz em ganhos consideráveis para a sociedade e ajuda a atingir uma maior sustentabilidade no setor da construção. O betão do futuro deverá ter em consideração necessariamente, não só fatores económicos mas também ambientais e sociais, pois só assim se poderá ter um betão sustentável e, conseqüentemente, uma construção civil mais sustentável.

1.2. Objetivos do relatório

É no contexto do desenvolvimento sustentável e de acordo com todas as suas vertentes (social, económica e ambiental) que o presente relatório de estágio se insere, estudando-se a viabilidade de aplicação de um resíduo advindo de uma indústria de reciclagem de vidro, em alternativa à sua deposição em aterro dos mesmos. A indústria de reciclagem de vidro em questão é a Vidrociclo, localizada na Figueira da Foz.

Pensando-se em diminuir a poluição por parte de um resíduo sólido, num mundo cada vez mais poluído e de forma cada vez mais séria, propõe-se neste trabalho reutilizar um resíduo resultante da reciclagem de vidro de embalagem, na construção civil, mais concretamente na substituição parcial de cimento na produção de betão. Deste modo, não só o custo de produção de betão pode ser reduzido, como também se reduz o consumo de recursos naturais e de CO₂ emitido para a atmosfera.

1.3. Organização do relatório

Para se alcançar os objetivos traçados no subcapítulo anterior, o trabalho foi organizado em diversas fases sequenciais, cuja estrutura e organização se mostraram cruciais. Assim, o presente relatório está organizado em sete capítulos.

No primeiro Capítulo (**Introdução**) faz-se o enquadramento teórico do tema do trabalho e apresentam-se os principais objetivos deste estudo.

No segundo Capítulo (**Empresa**) apresenta-se a empresa onde o estágio foi realizado (Vidrociclo), bem como questões ambientais relacionadas com a mesma.

No terceiro Capítulo (**Revisão de conhecimentos**) apresentam-se as bases de conhecimento com que se partiu para a realização deste estudo. Foram pesquisados todos os temas que, de uma forma ou de outra, estavam relacionados com o presente trabalho, como o material vidro propriamente dito, a reciclagem de vidro, o betão e os seus constituintes e a reatividade pozolânica.

No quarto Capítulo (**Caso de Estudo**) são descritas as tecnologias disponíveis na empresa Vidrociclo, bem como o seu processo produtivo. É ainda neste capítulo que se aborda o resíduo originado na empresa que se pretende valorizar, se procede à sua caracterização e ainda, se apresentam algumas alternativas possíveis à sua deposição em aterro.

No quinto capítulo (**Metodologia**) faz-se uma abordagem sobre a incorporação de resíduos de vidro em betão, desde a sua incorporação como agregado, como ligante, ou ainda sendo usado como matéria-prima no fabrico de cimento. Referem-se vários estudos realizados neste âmbito por outros autores, inclusivamente os resultados por eles obtidos. Toda esta informação recolhida revelou-se muito útil para as fases seguintes, tanto para a organização do trabalho experimental, como para a análise e compreensão dos resultados obtidos. Foca-se também neste capítulo a reação álcalis-agregado bem como, diversos fatores com ela relacionados. Por fim, entra-se na parte mais experimental do trabalho, onde é feita a caracterização dos materiais utilizados, é descrita a composição dos diversos provetes de betão estudados assim como, as metodologias e os ensaios feitos aos provetes de betão em estudo.

No sexto Capítulo (**Apresentação e Análise de Resultados**) são apresentados e discutidos os resultados obtidos em todos os ensaios realizados. São indicadas possíveis causas justificativas dos comportamentos observados nas várias propriedades, sendo também apontados possíveis erros laboratoriais que possam ter ocorrido.

No sétimo Capítulo (**Conclusões e Desenvolvimentos Futuros**) faz-se uma comparação geral de todos os resultados com outros estudos já realizados e referem-se sugestões para futuros desenvolvimentos do tema abordado.

2. Empresa

2.1. Apresentação da empresa

A Vidrociclo é uma filial do grupo *Maltha GlassRecycling International* (grupo holandês com uma vasta experiência no ramo, detentor de indústrias de reciclagem na Holanda, Bélgica, França e recentemente na Hungria), com sede na Holanda, que se dedica à reciclagem de resíduos de vidro de embalagem. Foi constituída em Portugal desde Outubro de 1994, fruto de uma sociedade entre profissionais da indústria vidreira nacional e o grupo empresarial *Maltha Groep*.

O aumento exponencial do casco recolhido a nível nacional deu-se com o aparecimento da Sociedade Ponto Verde, em 1996, sendo aí então evidente que o fenómeno de escala tornava, para além de desejável, possível a construção de uma unidade industrial de raiz, dotada à data dos meios técnicos estado de arte, capaz de processar para além do casco recolhido no âmbito nacional casco importado em quantidade suficiente para satisfazer a procura nacional deste produto. Esta unidade iniciou atividade em Julho de 1998 na zona industrial da Gala da Figueira da Foz. No espaço de menos de um ano a Vidrociclo começou a trabalhar 24 horas por dia, dada a crescente quantidade de casco recolhido e da recetividade do produto após processamento, estabilizando o processo num volume de 120000 toneladas por ano.

A Vidrociclo dedicou os primeiros anos da sua experiência ao conhecimento das técnicas de recolha seletiva de resíduos de vidro (designado como casco de vidro), enquanto aprofundava o conhecimento das necessidades específicas da indústria vidreira nacional. Recebe o vidro que é colocado nos vidrões, em Portugal e no Estrangeiro, e o produto final destina-se a substituir as matérias-primas virgens na produção de embalagens de vidro, com impacte ambiental positivo na redução de consumo de matérias-primas virgens, na redução do consumo energético e na redução de emissão de CO₂, SO_x e NO_x no processo de fusão.

No ano de 2006 foi sujeita a uma reestruturação industrial capaz de aumentar o volume de produção para as 160000 toneladas anuais, esforço muito significativo e possível dadas as sinergias criadas com a indústria vidreira nacional, mas também graças à dinâmica das estratégias internacionais, dado que a recolha nacional não podia garantir este volume de matéria-prima.

Com o lema “O ciclo do vidro é a nossa profissão”, a Vidrociclo pretende continuar a ser o líder nacional de reciclagem de casco de vidro de embalagem, tendo em atenção e antecipando as expectativas dos seus clientes, assumindo uma dimensão empresarial de nível europeu.

Atualmente a Vidrociclo produz 200000 toneladas anuais de casco de vidro apto para fusão.

A Vidrociclo quer ser reconhecida como líder nacional no setor do processamento de resíduos de vidro de embalagem, definindo-se como uma parceira de referência da Indústria Vidreira nacional. Alicerçada na melhoria contínua dos seus processos, pretende ser arrojada e consistente nas soluções oferecidas, de modo a gerar valor acrescentado a todas as partes interessadas.

Os principais valores da empresa são:

- A Vidrociclo está focalizada no cliente, nas suas expectativas e satisfação;
- A Vidrociclo rege a sua atividade por padrões éticos e profissionais;
- A Vidrociclo regula-se por elevados padrões de exigência;
- A Vidrociclo assume a sua responsabilidade social para com a comunidade, promovendo as melhores práticas ambientais, saúde e a segurança dos seus colaboradores;
- A Vidrociclo cumpre com todos as regulamentações inerentes à sua atividade, às entidades com quem trabalha e afins.

2.2. Sistema de Gestão Ambiental da empresa

Em Março de 2008 a Vidrociclo certificou o seu Sistema de Gestão da Qualidade, baseado nas normas NP EN ISO 9001:2000. No ano de 2009 a Vidrociclo certificou o seu Sistema de Gestão Ambiental baseado na norma NP EN ISO 14001:2004 integrado com o Sistema de Gestão da Qualidade ao abrigo da norma NP EN ISO 9001:2008. Em 2011 certificou o Sistema de Gestão da Segurança baseado na norma OSHAS 18001:2007. A sua política da Qualidade, Ambiente e Segurança está presente no **Anexo II**.

Segundo Pinto (2005), um aspeto ambiental é um qualquer elemento das atividades, produtos ou serviços da organização, que possa interagir com o ambiente, e um impacto ambiental é uma qualquer alteração no ambiente, adversa ou benéfica, resultante total ou parcialmente, das atividades, produtos ou serviços da organização.

Para tomar uma decisão sobre o carácter significativo dos aspetos ambientais, é necessário examiná-los e avaliá-los de forma a determinar um valor limite acima do qual os aspetos ambientais são significativos. Esse limite depende dos critérios utilizados, da gama de pontuação escolhida e dos fatores de ponderação.

Os aspetos ambientais identificados como significativos devem ser integrados no sistema de gestão ambiental e no processo de exame permanente. Os identificados como não significativos devem também ser objeto de levantamento, a fim de ter em conta mudanças circunstanciais. Para avaliar a importância dos aspetos ambientais em causa, as organizações devem definir os seus próprios critérios (APA, sem data).

A determinação dos Aspetos Ambientais Significativos (AAS) na Vidrociclo é efetuada pela combinação de critérios como a Gravidade, a Frequência ou a Probabilidade de ocorrência bem como a Magnitude da mesma. Ao quociente entre o produto das grandezas anteriores e a respetiva Capacidade de Controlo/Influência dá-se o nome de Significância dos Aspetos Ambientais. Na Vidrociclo considera-se como AAS todos os aspetos cujos valores de significância estejam acima do valor 2.67, bem como que o critério de gravidade seja 4 e a capacidade de controlo seja 1.

Os AAS da Vidrociclo são os seguintes:

- Consumo de combustível proveniente da deslocação de veículos pesados e também do transporte de casco pelas pás transportadoras;
- Consumo de energia elétrica associado a iluminação do parque e também ao funcionamento de equipamentos;
- Produção de resíduos não valorizáveis associados à operação de triagem de contaminação de casco.

Os diversos aspetos ambientais significativos da empresa Vidrociclo são apresentados na **Tabela 10 do Anexo I**.

A gestão de resíduos na empresa segue a política dos 5 R's – Reciclar, Recusar, Reduzir, Reutilizar e Repensar, assim como também previne e sensibiliza os colaboradores para os novos padrões de consumo.

A política dos 5 R's baseia-se no seguinte:

- Repensar – está dentro da mente de cada um de nós e consiste em usar o grande poder de decisão e escolha;
- Recusar – recusar produtos que não são necessários ou que de alguma maneira não contribuem para a preservação do meio ambiente;
- Reduzir – reduzir o consumo e pensar a real necessidade e utilidade do que se compra;
- Reutilizar – antes de descartar algum produto mesmo que para a reciclagem, analisar se pode de alguma maneira ser utilizado;
- Reciclar – optar pela reciclagem no caso de em mais nenhuma forma o resíduo poder ser aproveitado.

3. Revisão dos conhecimentos

3.1. O material vidro

3.1.1. Origem do vidro

A data exata da descoberta do vidro é ainda desconhecida havendo diversas opiniões em relação a este assunto. No entanto, um consenso foi estabelecido: a origem deste material é bastante remota. Afirma-se até que o vidro é um dos materiais mais antigos fabricados pelo Homem.

De acordo com a enciclopédia *Naturalis Historia* escrita por Plínio Caio Segundo, um dos maiores historiadores da antiguidade, a origem do vidro é atribuída aos Fenícios cerca de 7000 a.C. Segundo o relato, os Fenícios navegaram pelo Rio Belo na Síria, e resolveram parar nas margens do rio para fazerem as suas refeições. Colocaram então, sobre as margens arenosas do rio blocos de salitre onde apoiavam os seus caldeirões. Passado algum tempo verificaram que do meio do fogo saía uma substância líquida, viscosa e brilhante que solidificava rapidamente. Admite-se que os fenícios dedicaram muito tempo à reprodução daquele fenómeno, chegando à obtenção de materiais utilizáveis.

Há ainda uma outra versão de que teria havido fusão natural de areia em virtude de um incêndio provocado por um raio, que terá então resultado em vidro. De facto os vidros de origem natural sempre existiram, sendo estes formados quando alguns tipos de rocha são fundidos a elevadas temperaturas e, em seguida, solidificadas rapidamente. Esta situação pode ocorrer, por exemplo, nas erupções vulcânicas, e este tipo de vidros permitiu aos humanos da Idade da Pedra fazer ferramentas de corte para uso doméstico e para sua defesa.

Por volta de 5000 a.C. o povo egípcio já fabricava peças inteiramente de vidro, que foram encontradas nos túmulos dos Faraós, tanto como adornos como cravados nas máscaras mortuárias de ouro. Desde 1550 a.C. até à Era Cristã, o Egito conservou o primeiro lugar

na indústria do vidro (Martins e Pinto, 2004), e foi em 250 a.C. que se deu o grande passo na indústria vidreira, com a descoberta do método de sopro na fabricação deste material, quando artesãos sírios da região da Babilónia criaram um tubo de ferro com cerca de 100 a 150 cm de comprimento, com uma abertura de cerca de 1 cm de diâmetro. Este artefacto era introduzido no forno contendo a massa de vidro fundida, e permitia retirar uma certa quantidade que era soprada pela extremidade oposta, dando origem a uma peça oca. De acordo com Alves *et al* (2001) data desta época também, a utilização de moldes de madeira para a produção de peças de vidro padronizadas.

Os primeiros vidros incolores entretanto, só foram obtidos por volta de 100 d.C., em Alexandria, graças à introdução de óxido de manganês nas composições e de melhoramentos importantes nos fornos, como a produção de altas temperaturas e o controle da atmosfera de combustão, os quais tiveram marcada uma influência sobre a qualidade dos vidros e permitiram uma fusão mais eficiente dos materiais constituintes (Alves *et al*, 2001).

Desde o princípio que os vidros fabricados tinham um carácter utilitário, permitindo a construção de ânforas¹, vasos, utensílios para decoração etc. Mais tarde, a idade do luxo do vidro foi o período do Império Romano, em que o refinamento e a qualidade da arte de trabalhar o vidro permitiam criar joias e imitações de pedras preciosas. Segundo Martins e Pinto (2004), os romanos aprenderam a técnica de produzir vidro com o povo egípcio, mas desenvolveram processos de lapidação, pintura, coloração, gravura e moldagem do vidro soprado. Foi no tempo de Tibério que esta indústria se expandiu a outros países conquistados pelos romanos.

Mais tarde, no ano de 1200, Veneza alcançou a sua idade de glória na produção e exportação de vidro, através da criação de um vidro que se distinguiu, principalmente, pelas finuras das suas peças, denominadas “Cristallo”.

Ao longo destes anos a proteção aos vidreiros era elevada, chegando-se ao ponto de se proibir a saída destes operários para o estrangeiro. Apesar de todos os esforços, alguns trabalhadores conseguiram emigrar para a Alemanha e aí desenvolver esta indústria que, a pouco e pouco, se foi espalhando pelo mundo (Martins e Pinto, 2004).

Em 1664 os franceses descobriram uma nova maneira de fabricar vidro prateando-o e, desta forma, produziam espelhos de alta tecnologia. Com o progresso da ciência e da indústria

¹ Vasos antigos de origem grega de forma geralmente ovoide e possuidoras de duas alças.

o vidro obteve várias alternativas de uso como o da iluminação de aparelhos científicos e óticos.

3.1.2. História da indústria vidreira em Portugal

De acordo com os dados históricos, os primeiros vidreiros fixaram-se em Portugal no século XVI sendo que, até ao século XIX a produção de vidro se manteve sob a forma artesanal ou pré-industrial. A Fábrica do Côvo, situada no concelho de Oliveira de Azeméis e fundada em 1484, foi uma das mais importantes e antigas oficinas artesanais de vidro em Portugal.

Mais tarde D. João V fundou uma indústria de produção de vidro a Sul de Lisboa, em Coina, que foi mais tarde transferida para a Marinha Grande devido à proximidade com o Pinhal de Leiria, facilitando assim o acesso a combustível para os fornos (lenha) em grande quantidade, dada a abundância de matéria-prima nesta zona. Esta fábrica deixou então de se denominar Real Fábrica de Vidro de Coina para se chamar Real Fábrica de Vidro da Marinha Grande, e recebeu um subsídio do Marquês de Pombal para ser reestruturada. Em 1748 passou a ser administrada por John Beare e mais tarde, apesar dos esforços, acabou por encerrar em 1760.

Em 1769 Guilherme Stephens beneficiou de proteção do Marquês de Pombal e criou, também na Marinha Grande, uma nova empresa de produção de vidro que após a sua morte, viria a ser gerida pelo seu irmão Diogo Stephens. Em 1826, com a morte de Diogo Stephens, a fábrica abriu falência por falta de pessoas capazes de a gerir.

Na década de 1870, foram efetuadas algumas tentativas de instalação de outras fábricas de vidro na referida localidade, mas sem êxito uma vez que estas laboravam apenas durante curtos períodos de tempo que, em geral, não ultrapassaram os dois anos. Maior sucesso teve, contudo, a unidade instalada em 1889 por José dos Santos Barosa (1855-1923), a qual esteve na origem de uma moderna e atualizada fábrica de vidro de embalagem, atualmente explorada pela firma Santos Barosa - Vidros, SA.

Nas primeiras duas décadas do século XX acentuou-se o ritmo de criação de fábricas vidreiras, não só na Marinha Grande como em algumas outras localidades do país.

Atualmente, e relativamente à produção de vidro de embalagem, existem cinco empresas a laborar em Portugal:

- BA Vidro SA (com uma fábrica em Avintes – Vila Nova de Gaia e outra na Marinha Grande - Leiria);

- Gallo Vidro SA (Marinha Grande - Leiria);
- Santos Barosa SA (Marinha Grande - Leiria);
- Sotancro SA (Venda Nova – Lisboa);
- Saint-Gobain Mondego SA (Fontela – Figueira da Foz).

3.1.3. Definição de vidro

O vidro é um material cerâmico, uma vez que é feito a partir de materiais inorgânicos a altas temperaturas. No entanto, distingue-se dos outros cerâmicos pelo facto dos seus constituintes serem aquecidos até à fusão e depois serem arrefecidos e solidificados de uma forma relativamente rápida, não ocorrendo cristalização. Assim, um vidro pode ser definido como um produto inorgânico, amorfo e fisicamente homogéneo, que sofre fusão e de seguida é rapidamente arrefecido pelo aumento contínuo da viscosidade, desde o estado fundido até um estado rígido, sem cristalização (Smith, 1998).

Na indústria vidreira o termo “vidro” é predominantemente usado para vidros de silicato (sílico-sodo-cálcico), ou seja, que contêm uma elevada percentagem de sílica (SiO_2).

Os produtos de vidro são obtidos aquecendo primeiro o vidro a uma temperatura que dê origem a um líquido viscoso, o qual é em seguida moldado, estirado ou laminado, de modo a obter-se a forma desejada (Smith, 1998).

3.1.4. Características do vidro

Os vidros possuem propriedades especiais não existentes em outros materiais de engenharia. A combinação de transparência e dureza à temperatura ambiente, conjuntamente com a suficiente resistência mecânica e excelente resistência à corrosão na maioria dos ambientes normais, tornam os vidros indispensáveis para muitas aplicações de engenharia, tais como no envidraçamento de construções e de veículos. Na indústria elétrica, o vidro é essencial para vários tipos de lâmpadas devido às suas propriedades isoladoras e à capacidade de criar invólucros herméticos. Na indústria eletrónica, as válvulas e os tubos eletrónicos também exigem o invólucro hermético que o vidro permite, conjuntamente com as suas propriedades isoladoras para os bornes. A grande resistência química do vidro torna-o útil para montagens laboratoriais e para revestimentos interiores de tubagens e reatores na indústria química (Smith, 1998).

Uma das características do vidro é que ele tem uma estrutura não-cristalina ou amorfa, ou seja, as moléculas de um vidro não estão dispostas numa ordem repetitiva e regular a longa distância, como a que existe num sólido cristalino. Num vidro as moléculas mudam de orientação de um modo aleatório ao longo do material sólido (Smith, 1998). Este facto deve-se essencialmente ao arrefecimento rápido que impede os átomos, moléculas e iões de se organizarem segundo uma estrutura cristalina. Como consequência, o vidro não derrete a elevadas temperaturas como outros materiais, mas sim amolece lentamente (IPTS, 2011). Por outro lado, o vidro é um material com uma elevada durabilidade e resistência química, sendo apenas atacado pelo ácido fluorídrico.

O vidro tem vantagens em relação a outros tipos de material de embalagem transparente, porque permite oferecer uma boa visualização do material contido. Outra boa qualidade do vidro é a sua excelente resistência ao ataque da maioria dos líquidos e, portanto, resiste à interação com os produtos contidos. Também é totalmente impermeável aos gases, e pode ser esterilizado com qualquer processo adequado. Por outro lado, quando apresenta determinada coloração também protege da luz (Matos, 2010).

Destacam-se ainda as seguintes características:

- **Inalterável** – não é oxidável pelo ar, a humidade não lhe retira o brilho e o calor não o deforma.
- **Inerte** – um material inerte é um material que não sofre transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e que, quando submetido a um teste de solubilização, não apresenta nenhum dos seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões. O vidro sendo um material com esta característica, possui taxas muito baixas de lixiviação das suas substâncias constituintes para os produtos em contacto com ele e, portanto, tem um baixo risco de migração de substâncias para os alimentos.
- **Resistente** – o tratamento térmico que o vidro permite dota-o de uma extraordinária resistência, o que se reflete numa boa relação qualidade/preço.
- **Versáteis** – são imensas as formas, cores e tamanhos que se podem conferir a uma embalagem de vidro. Nenhum outro material permite tanta margem de versatilidade onde o limite é, apenas, a imaginação de quem o produz.
- **Reciclável** - é um material 100% reciclável, o que o torna um item único no universo da engenharia. Por meio da reciclagem, o vidro pode ser utilizado infinitamente, sem perda de qualidade.

- **Isolante** – conserva mais tempo a temperatura interior que qualquer outro tipo de material.
- **Transparente** – não tem poros no entanto permite ver o que está no seu interior.

3.1.5. Estrutura química do vidro

De acordo com Zachariasen (1932) e citada por Shi (2007), os componentes de um vidro podem ser classificados em três grupos: *formadores de rede*, *modificadores de rede* e *intermédio*.

A maioria dos vidros inorgânicos não é composta por moléculas discretas mas sim, por redes conectadas tridimensionalmente. A unidade básica destes vidros é o dióxido de silício SiO_2 que dá origem a uma fase vítrea. Por esse mesmo facto, este óxido é denominado como um *formador de vidro*.

A unidade estrutural básica da sílica (SiO_2) é um ião Si^{4+} ligado covalente e ionicamente a quatro iões de oxigénio O^{2-} , com disposição em tetraedro (Figura 1). Assim, as partículas de sílica são compostas de tetraedros ligados entre si pelos seus vértices, em que cada vértice está ocupado por um oxigénio comum a dois tetraedros.

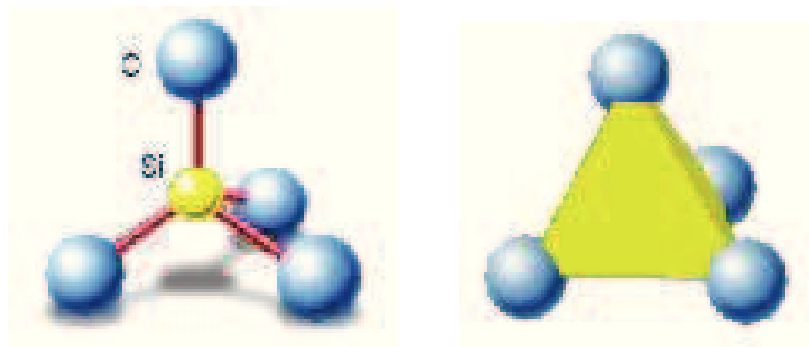


Figura 1: Representação esquemática de um tetraedro de SiO_4^{4-}
(<http://platea.pntic.mec.es/cmarti3/GEO/MIN/neso.htm>)

Os tetraedros de SiO_4^{4-} estão ligados pelos vértices, através da partilha de um átomo de oxigénio, por dois átomos de silício. Todos os quatro átomos de oxigénio de um tetraedro podem ser compartilhados com quatro outros tetraedros formando uma rede tridimensional (Akerman, 2000).

A estrutura interna dos tetraedros na forma cristalina apresenta-se com estes ligados de modo a criar uma rede tridimensional orientada, enquanto que nas formas amorfas é formada

uma rede aleatória, com estrutura interna desordenada (Fernandes, 2005). Na sílica cristalina, os tetraedros criados pelas ligações Si-O estão ligados vértice a vértice numa disposição regular com ordem a longa distância, conforme se esquematiza na **Figura 2.a**. Num vidro de sílica pura, os tetraedros estão ligados vértice a vértice formando uma *rede irregular*, sem ordem a longa distância, (**Figura 2.b**). (Notar que cada átomo de silício está ligado a um quarto átomo de oxigénio abaixo ou acima do plano do papel) (Smith, 1998).

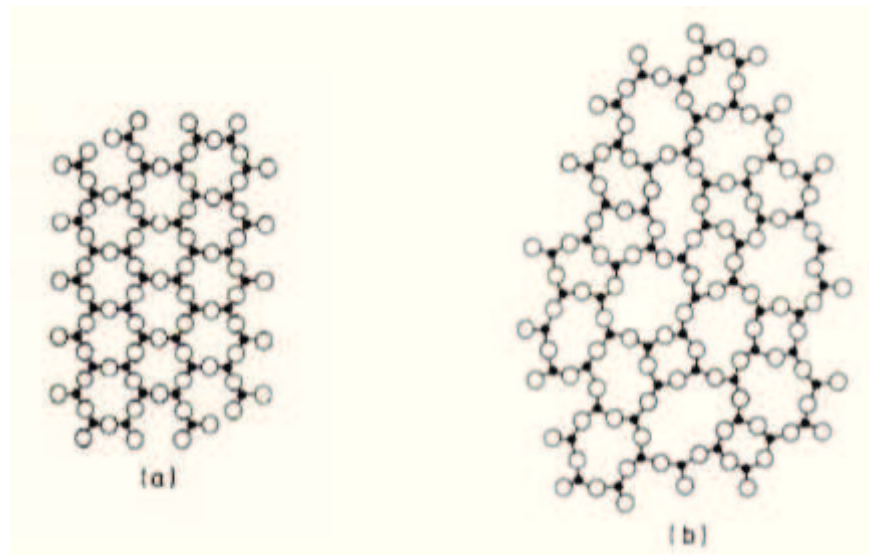


Figura 2: Representação esquemática de: (a) Sílica cristalina (b) Vidro de sílica pura (Sílica vítrea)

(Akerman, 2000)

Segundo Akerman (2000), os oxigénios partilhados são chamados de “oxigénio-pontes”. Em vidros ou em minerais de sílica pura, como o quartzo, cada oxigénio é ligado a dois átomos de silício sendo que todos os oxigénios são oxigénios-ponte.

Contrariamente aos óxidos formadores de rede, existem os óxidos *modificadores de rede*, ou seja, óxidos que destroem a rede do vidro. Segundo Smith (1998), ao vidro de sílica adicionam-se óxidos de elementos alcalinos, tais como o Na_2O (Óxido de sódio) e o K_2O (Óxido de potássio), e óxidos de elementos alcalino-terrosos, tais como o CaO (Óxido de cálcio) e o MgO (Óxido de magnésio), a fim de diminuir a viscosidade, para que o vidro possa ser trabalhado e enformado mais facilmente. Os átomos de oxigénio provenientes destes óxidos entram na rede da sílica em pontos de junção dos tetraedros e interrompem a rede, dando origem a átomos de oxigénio com um eletrão não-partilhado. Os iões de Na^+ e K^+ provenientes do Na_2O e do K_2O não entram na rede, mas permanecem nos interstícios da rede como iões metálicos ligados ionicamente. Isto interrompe a continuidade da rede, já que

alguns dos átomos de oxigénio deixam de ser compartilhados entre dois tetraedros, passando a ser ligados somente a um átomo de silício (**Figura 3**). Ao preencherem alguns interstícios, estes íões promovem a cristalização do vidro.

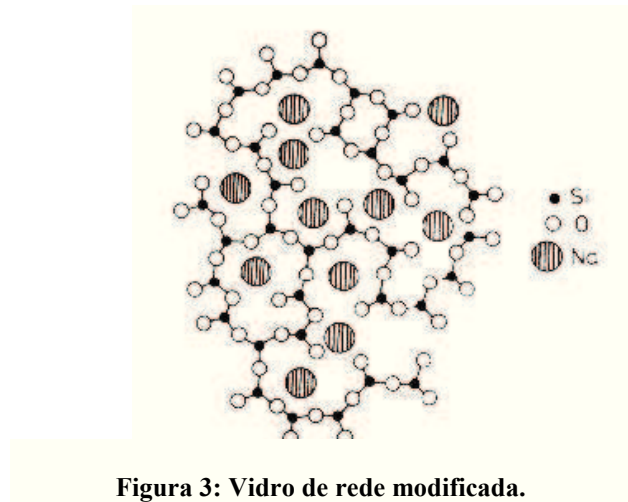


Figura 3: Vidro de rede modificada.
(Akerman, 2000)

Existem ainda outros óxidos que não podem, por si sós, dar origem à rede de um vidro, mas podem juntar-se a uma rede já existente. Estes óxidos são denominados *óxidos intermédios*. Como exemplo desses óxidos tem-se o óxido de alumínio, Al_2O_3 , que pode entrar na rede da sílica na forma de tetraedros de AlO_4^{4-} , substituindo alguns dos tetraedros de SiO_4^{4-} .

Ao vidro de sílica adicionam-se óxidos intermédios para se obterem propriedades especiais. Por exemplo, os vidros de alumino-silicato são capazes de resistir a temperaturas mais altas do que o vidro normal. O óxido de chumbo é outro óxido intermédio que é adicionado a alguns vidros de sílica. Dependendo da composição do vidro, os óxidos intermédios podem por vezes atuar como modificadores de rede, ao mesmo tempo que fazem parte da rede do vidro (Smith, 1998).

3.1.6. Constituição do vidro

A principal matéria-prima do vidro é a areia ou o quartzo (forma cristalina da sílica) que constitui cerca de 70% das matérias-primas usadas. Este facto confere à produção de vidro uma vantagem notória relativamente à produção de outros materiais, pois usa um dos mais abundantes materiais à superfície da Terra (MacDonald, sem data). Para além da areia, as restantes matérias-primas usadas no fabrico do vidro são o calcário, a dolomite, o feldspato, o cianeto nefelínico (óxido arsénico para auxiliar a libertação de CO_2 a CO

proveniente de carbonatos de cálcio e sódio), a alumina calcinada, hidróxido de cálcio, os afinantes, corantes ou descorantes e vidro reciclado (Matos, 2010).

Na sua forma química mais simples, o vidro pode consistir em sílica pura chamando-se assim de “vidro de quartzo” ou “quartzo fundido”. No entanto, a produção deste tipo de vidro é um processo altamente energético, requerendo temperaturas à volta de 1900°C, pelo que este tipo de vidro é apenas produzido para aplicações que exijam uma elevada resistência química (IPTS, 2011). De forma a diminuir a energia usada na produção de vidro, a maioria dos vidros são compostos por sílica e outros compostos (IPTS, 2011).

A cor do vidro deve-se em grande parte à presença de iões metálicos (na forma de óxidos). Por exemplo, o vidro verde contém óxido de ferro (III), Fe_2O_3 , ou óxido de cobre (II), CuO ; o vidro âmbar contém óxido de urânio (IV), UO_2 ; o vidro azul contém óxidos de cobalto (II) e cobre (II), CoO e CuO ; e o vidro vermelho contém pequenas partículas de ouro e cobre (Chang, 2005).

De acordo com o estudo feito por Chen *et al* (2002), a composição química do vidro não varia significativamente com a sua cor ou origem, mas depende sim da aplicação a que este se destina.

Esta variação na composição resulta numa enorme variedade de tipos de vidro e uma variedade de propriedades correspondentes. As propriedades do vidro dependem sempre da sua composição permitindo, a partir de um conjunto de requisitos exigidos por uma aplicação específica, adaptar a composição correspondente.

Uma das razões de o vidro ser tão duradouro, deve-se ao facto de o vidro mais comum (sílico-sodo-cálcico), usado para fazer os vidros planos e embalagens, ter uma composição química muito parecida com a crosta terrestre. A **Tabela 11** do **Anexo I** demonstra essa similaridade.

3.1.7. Tipos de vidro

Hoje em dia usam-se cerca de 800 tipos de vidro. Os principais tipos de vidro relativamente à sua composição físico-química são:

- **Vidro sódico – cálcico ou sílico-sodo-cálcico** – é o tipo mais comum de vidro representando cerca de 90% de todos os vidros produzidos. A sua composição básica é de 71 a 75% de SiO_2 (dióxido de silício ou sílica proveniente da areia – funciona como vitrificante), 12 a 16% de Na_2O (óxido de sódio proveniente do carbonato de sódio – funciona como fundente) e 10 a 15% de CaO (óxido de cálcio derivado da pedra de cal – funciona como

estabilizante). O Na_2O e o CaO diminuem o ponto de amolecimento deste vidro de 1600 para 730°C , para que o vidro seja mais fácil de moldar. A este tipo de vidro são adicionados também 1 a 4% de MgO (óxido de magnésio) a fim de impedir a desvitrificação, e ainda 0,5 a 1,5% de Al_2O_3 (óxido de alumínio) para aumentar a durabilidade. (Smith, 1998). Este tipo de vidro tem três tipos de aplicações principais: i) recipientes de vidro (garrafas, frascos de embalagens); ii) vidro plano (janelas de edifícios, automóveis); iii) vidro doméstico (louça em vidro).

- **Vidro de boro – silicato** – constituído por 60 a 80% de SiO_2 , 10 a 25 % de B_2O_3 e 1 a 4% de Al_2O_3 (Oliveira, 2012). Esta existência de trióxido de boro (B_2O_3) na rede sílica vítrea dá origem a um vidro com uma durabilidade maior, bem como uma maior resistência à corrosão química, à água e ainda ao calor devido ao seu coeficiente de dilatação térmica baixo. O vidro de boro – silicato (vidro Pirex) é usado em tubagens, artigos de fornos, em faróis herméticos, equipamentos de laboratório, como seringas, ampolas, frascos e cartuchos para uso farmacêutico, utensílios de cozinha, iluminação (como lâmpadas de alta potência), janelas de proteção contra incêndio e lã de vidro (IPTS, 2011).

- **Vidro de chumbo** – o óxido de chumbo atua normalmente como modificador da rede de sílica, mas também pode atuar como um formador de rede. Neste tipo de vidro, são então usados óxidos de chumbo (PbO e Pb_3O_4) para melhorar a sonoridade e aumentar o índice de refração do vidro. Isto cria o elevado brilho nos vidros de cristal em usos domésticos. São ainda usados em janelas, invólucros de lâmpadas fluorescentes e tubos de televisão. Os vidros de elevado teor em óxidos de chumbo exigem menores temperaturas para a sua fusão e diminuem a sua viscosidade, o que facilita o seu manuseamento. No entanto, o chumbo pode ser uma fonte de impacto ambiental se for lixiviado.

- **Vidro elétrico ou Vidro E** – é um tipo especial de vidro boro – silicato em que parte do trióxido de boro é substituído por óxido de alumínio e é caracterizado por um baixo teor alcalino (<2%). Este tipo de vidro tem uma elevada resistência elétrica e foi desenvolvido para revestimento de isoladores de fio externo (IPTS, 2011).

- **Vidro de sílica** - este vidro é transparente a uma elevada gama de frequências, tem uma elevada resistência química e ao choque térmico, sendo assim mais utilizado em laboratórios. É constituído por 99,5% de SiO_2 (Oliveira, 2012).

Os diferentes tipos de vidros existentes, bem como a sua constituição estão esquematizados e descritos na **Tabela 12** apresentada no **Anexo I**.

A indústria vidreira é muito diversificada e inclui a produção de uma grande variedade de produtos e tecnologias. O fator comum à produção desses mesmos produtos é que todos eles precisam de fornos de fusão de vidro para a sua fabricação. Como fatores variantes de setor para setor tem-se as matérias-primas necessárias, o tamanho e tipo de forno, a quantidade de energia necessária, o tipo de combustível utilizado, a quantidade de pó de vidro que pode ser utilizada e o período de tempo necessário para fundir e produzir um produto.

Classificam-se então assim, seis principais setores de produção de vidro:

- **Vidro de embalagem** – Garrafas, boiões e outros frascos de vidro para alimentos, bebidas, produtos farmacêuticos, cosméticos, higiene pessoal, etc. A utilização do vidro para embalagens é uma das mais antigas e frequentes aplicações e, por ordem de consumo, a maior utilização é a do setor de bebidas, seguida pela indústria de produtos alimentícios (Abividro, 2012). Estima-se que a produção destes produtos de vidro constitui cerca de 56% da produção total de produtos de vidro a nível europeu.

- **Vidro plano** – Os vidros planos, fabricados em chapas, são consumidos principalmente pela construção civil, indústria automobilística, produção de espelhos e um pequeno percentual para outras múltiplas aplicações (Abividro, 2012). Os produtos deste tipo de vidro podem ser classificados em dois tipos: vidro flutuante e vidro laminado. O vidro flutuante é usado para um número enorme de aplicações, incluindo vidros para a construção e veículos, aplicações industriais, eletrodomésticos, móveis, etc. Quanto ao vidro laminado é usado principalmente na fabricação de portas de vidro, divisórias e painéis fotovoltaicos. Em termos de fabrico, as instalações de vidro laminados têm fornos muito menores do que as do vidro flutuante. A taxa de produção destes produtos a nível europeu é de cerca de 25%.

- **Vidro doméstico ou de mesa** – Usado no fabrico de louça e vidro decorativo. Os seus componentes mais importantes são vidro sódico-cálcicos, vidro de chumbo, vidro de cristal, vidro boro-silicato, alumina e vidro cerâmico. A taxa de produção destes produtos a nível europeu é de cerca de 4%.

- **Fibras de vidro de filamentos contínuos** – este tipo de vidro é usado principalmente no reforço de materiais poliméricos. O principal mercado para este material é a indústria da construção civil, o setor automóvel e a indústria de eletricidade e produtos eletrónicos. As fibras de vidro de filamentos contínuos são feitas, principalmente, de vidro elétrico. A taxa de produção destes produtos a nível europeu é de cerca de 2%.

- **Lã de vidro de isolamento** – Este tipo de produto é feito de fibras curtas de materiais de vidro e de cerâmica e é usado para o isolamento, filtragem e aplicações antifogo. Estima-se que a taxa de produção destes produtos na Europa é cerca de 10%.

- **Vidros especiais** – São vidros com composições e características especiais, adequadas a necessidades específicas de utilização (Abividro, 2012). Esta categoria abrange uma grande variedade de produtos de vidro, nomeadamente: vidro ótico para fins oftalmológicos, vidro de equipamentos de laboratório (em parte feita de vidro de borossilicato), tubos de vidro, vidro usado em iluminação, garrafas térmicas, fibras óticas, blocos isoladores, vidro que compõe os monitores de computador e televisão (CRT), assim como o vidro usado em outros equipamentos eletrônicos, tais como em telas LCD. A sua produção a nível europeu estima-se numa taxa de cerca de 3% da totalidade de produção de produtos vidreiros. Nesta categoria dos vidros especiais destacam-se ainda dois tipos de vidros: o vidro aramado e o vidro temperado.

➤ **Vidro aramado** - é um tipo de vidro fabricado com uma rede metálica de malha de aço quadriculada incutida, com a finalidade de aumentar a sua resistência e conceder maior segurança aos seus utilizadores. A rede metálica incorporada ao vidro tem como função principal segurar os estilhaços de vidro em caso de quebra. Ou seja, em caso de quebra, o vidro fica preso à rede metálica reduzindo assim, os riscos de ferimentos. Por outro lado, este material tem uma enorme resistência ao fogo, sendo até considerado como um material anti-chama. Devido a estas suas características é frequentemente usado em portas corta-fogo, portas de elevadores, janelas, condutas de ventilação vertical, entre outras.

➤ **Vidro temperado** – vidro que tem a sua resistência aumentada devido à têmpera a que é sujeito. Esta têmpera consiste num processo de aquecimento do vidro até uma temperatura crítica e depois arrefecido rapidamente. Esta têmpera produz um sistema de tensões que aumenta a resistência, induzindo tensões de compressão na sua superfície. Como a fratura geralmente ocorre por um defeito na superfície, que provoca uma concentração de tensões, a pré-compressão da superfície permite uma resistência muito maior. Devido às tensões induzidas no vidro temperado, quando este rompe em qualquer ponto, toda a sua área se parte em pequenos fragmentos sem arestas cortantes e lascas pontiagudas, menos suscetíveis de causar ferimentos (Martins e Pinto, 2004). O vidro temperado é fabricado a partir do vidro comum possuindo por isso, todas as suas características tais como, transparência, coloração e paralelismo nas faces.

No gráfico a seguir apresentado é possível analisar a contribuição percentual de cada setor de fabricação de vidro, para o volume total de produção deste material.

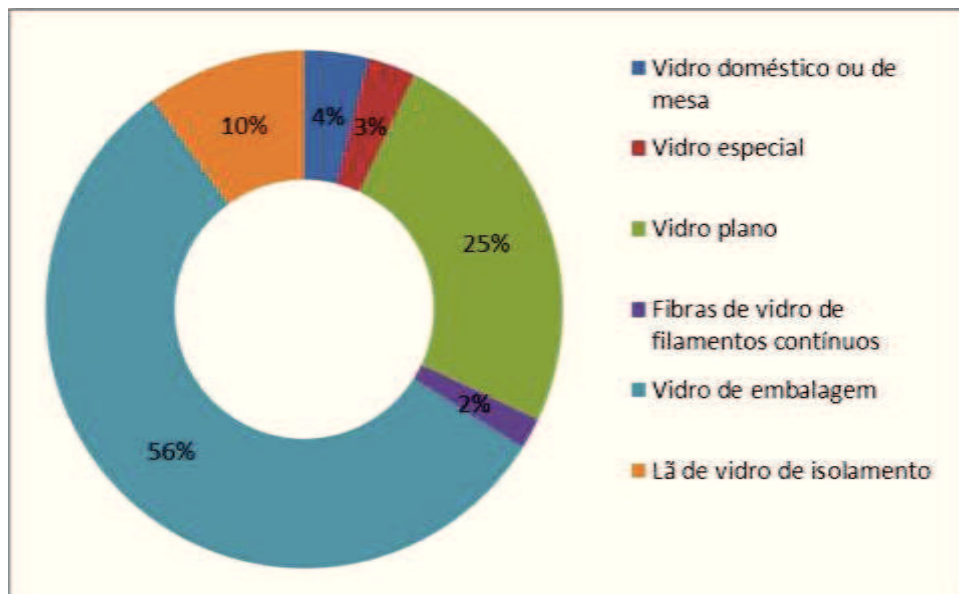


Gráfico 1: Setores da indústria de fabricação de vidro, e suas contribuições percentuais para o volume total de produção (2007)

(Baseado nos dados estabelecidos em IPTS, (2011))

3.2. Reciclagem do vidro

O vidro foi um dos primeiros materiais a ser reciclado. O excessivo consumo de recursos naturais, bem como o aumento dos custos de limpeza e reutilização das embalagens de vidro, fez com que seja mais rentável a sua destruição e posterior reciclagem com o objectivo de obter vidro novo.

Grande parte dos produtos feitos à base de vidro podem ser reutilizados nomeadamente, garrafas de vidro, embalagens de alimentos, entre outros, reduzindo assim o preço dos produtos e garantindo menos resíduos para o futuro.

Vários tipos de aproveitamento dos resíduos têm sido propostos para solucionar ou minimizar o problema de aterros. A reciclagem, isto é, o retorno ao consumo dos materiais que possuem ainda algum valor agregado, é o mais indicado e, no que toca a resíduos de vidro, pode ser realizada de duas formas básicas: **reciclagem primária** e **reciclagem secundária**. Na reciclagem primária, a de ciclo fechado ou infinito, um material é retornado ao mesmo produto. A reciclagem secundária ou mecânica reprocessa materiais descartados noutros produtos ou materiais.

De acordo com Santos (2012) citado por Oliveira (2012), o processo de reciclagem mais corrente do vidro doméstico de embalagens consiste na produção de novas embalagens. Assim, o vidro é derretido novamente, possibilitando a produção de novos utensílios. O

produto feito com vidro reciclado é tão higiénico e limpo quanto o que é feito a partir de matérias-primas. Este tipo de reciclagem de vidro já é amplamente utilizado, com grande eficiência.

A reciclagem de vidro em ciclo fechado ou infinito (reciclagem primária) é então a preferida pelos produtores de embalagens de vidro, no entanto, quando isto é economicamente ou tecnicamente inviável, a reciclagem secundária é alternativa para evitar o recurso a aterros. Outras formas de reciclagem de vidro são a sua utilização como agregado em betão ou em leitos de estradas, a sua utilização como ligante em betões, a sua utilização em azulejos, tijolos de vidro, painéis de parede, fibras de vidro para isolamento, fertilizantes agrícolas, louças, tintas reflexivas, filtros, na fabricação de matérias abrasivas, entre outras aplicações.

Na figura seguinte pode-se analisar o ciclo de reciclagem primária do vidro.



Figura 4: Ciclo infinito da reciclagem do vidro.

(Adaptado de www.abividro.org.br)

Segundo Letras (2011), a reciclagem em massa de vidro doméstico de embalagem começou na década de 80 do século passado, tendo sido este o primeiro resíduo a dispor de contentores de grandes dimensões para a sua recolha seletiva. Russo (2009) indica que 5% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) correspondem a vidro doméstico de embalagem. Em 2010, foram recolhidas, em Portugal, 425 000 toneladas deste resíduo (Letras, 2011).

Conforme indicado, as embalagens de vidro são maioritariamente de vidro sílico-sodo-cálcico.

Na Europa, a reciclagem de embalagens de vidro é uma das mais bem sucedidas iniciativas para proteger os recursos naturais e o meio ambiente. Em alguns países europeus, mais de 85% das embalagens de vidro são recicladas e transformadas em novas garrafas e embalagens. Todos beneficiam desta prática ambiental, não só o produtor como também o consumidor e, obviamente, o ambiente.

Segundo Mata (1998), Portugal tem tido grandes progressos em termos da recolha do vidro usado. Face ao panorama europeu, em 1995 e no que diz respeito à reciclagem de vidro, Portugal já estava acima de alguns países, mas a indústria prossegue sempre com o objetivo de melhorar o seu desempenho.

Segundo dados da Sociedade Ponto Verde consultados a 19/2/2013 no seu website, o número de embalagens de vidro recolhidas em Portugal tem vindo a aumentar ao longo dos anos. No entanto, em 2012 recolheram-se 16 9513 toneladas de embalagens de vidro, valor este que foi inferior ao valor de 2011 em cerca de 47 645 toneladas. Este decréscimo pode ser facilmente explicado pelo menor consumo de produtos devido á crise económica que a nossa sociedade atravessa atualmente.

3.2.1. Vantagens da reciclagem do vidro

Os benefícios da reciclagem deste material englobam não só a vertente ambiental como também a vertente económica e, conseqüentemente, a vertente social.

Do ponto de vista ambiental, o uso de vidro para a criação de novos produtos reduz em muito a necessidade de extração e transporte de matérias-primas originais. Isto desencadeia uma poupança de energia (elétrica e combustível) levando assim, a uma poupança a nível económico para as indústrias vidreiras. Para além disso, traz também uma poupança de recursos naturais (a produção de uma tonelada de vidro implica um gasto médio de 1,4 toneladas de matéria-prima e por cada tonelada de resíduos de vidro incorporada na fusão poupam-se 400 kg de matéria-prima) e uma redução de CO₂ emitido para a atmosfera pelas máquinas usadas para essa mesma extração (por cada tonelada de vidro reciclado são emitidos menos 200 kg de CO₂ ou, por outras palavras, por cada 10% de vidro produzido a partir de vidro reciclado as emissões de CO₂ são reduzidas em 5%).

É de referir também que, a produção de vidro a partir de vidro reciclado consome menor quantidade de energia pois funde a temperaturas inferiores, o que reforça as poupanças económicas e ambientais referidas anteriormente.

Uma outra vantagem prende-se com a redução de resíduos enviados para aterros sanitários e que demorariam cerca de 5 mil anos a decompor.

Por outro lado, com a implementação de redes de recolha e de empresas de reciclagem de vidro, são criados novos postos de trabalho, o que é um benefício a nível social.

3.2.2. Resíduos de vidro para reciclagem: casco

3.2.2.1. Tipos de casco

A palavra *casco* (*cullet* na literatura inglesa) refere-se a todos os resíduos de vidro e vidro quebrado. Existem dois tipos de casco: o **casco interno** e o **casco externo**. O casco interno é composto por peças de vidro defeituosas que são detetadas e rejeitadas pelo processo de controlo de qualidade, durante a produção de vidro em indústrias vidreiras, de fase de transição de mudança nos produtos (mudanças de cor ou espessura) e restos de produção. A base da definição de casco interno é o facto de estes materiais serem imediatamente aproveitados pelo respetivo processo industrial, como matéria-prima para uma nova operação de fusão, não chegando estes a abandonar a instalação. Este tipo de casco não é considerado resíduo pois nunca chegou a ser produto (IPTS, 2011).

Quanto ao casco externo, define-se como sendo os resíduos de vidro que são recolhidos e/ou reprocessados com o objetivo de serem reciclados (IPTS, 2011). Existem dois tipos de casco externo: o **casco de pré-consumo** e o **casco de pós-consumo**. O primeiro é referente aos resíduos de vidro resultantes de produtos que contenham vidro como um dos seus componentes, e que deixam a instalação específica onde foram gerados, tornando-se assim um resíduo mas não chegando a atingir o mercado consumidor. Um exemplo deste tipo de casco é o resíduo de vidro constituído por peças defeituosas da produção de vidro de janelas de carro, e que deixa a instalação produtora de vidro de janela de carro e é refundido em indústrias de produção de vidro plano (IPTS, 2011). Este tipo de casco é, geralmente, muito homogéneo não necessitando de grandes graus de separação e tratamento. Relativamente ao casco de pós-consumo, corresponde aos resíduos de vidro originados depois dos produtos fabricados serem usados pelo mercado consumidor, ou seja, aos resíduos de vidro vindos da recolha seletiva de resíduos municipais como resultado da separação feita

pelos cidadãos, resíduos industriais, resíduos de construção e demolição, resíduos de eletrodomésticos e resíduos de veículos em fins de vida.

Ao longo deste relatório e de acordo com a nomenclatura usada na política da empresa, o termo “casco” recebe a distinção entre “casco de matéria-prima ou casco à entrada” para se abordar os resíduos de vidro que chegam à empresa, ou seja, casco não processado, e o termo “casco apto para fusão ou casco à saída” para se referir ao produto que sai da empresa, isto é, o casco reprocessado. O casco reprocessado na Vidrociclo é ainda denominado como “casco de mistura”, ou seja, um casco onde não há separação do vidro por cores.

3.2.2.2. Contaminantes do casco à entrada

O casco à entrada apresenta uma variedade de contaminantes, isto é, materiais presentes nos resíduos de vidro que são indesejados para o seu uso final. A seguir são apresentados os principais contaminantes presentes no casco de matéria-prima:

- **Metais Ferrosos:** tampas em chapa, caricas de garrafas, latas de conserva, sumos, tintas, vernizes, óleos, etc., sucata proveniente de eletrodomésticos e de veículos automóveis. Geralmente este tipo de contaminante representa cerca de 0,5 a 1% do fluxo total de casco a ser tratado. Contaminam o vidro provocando manchas de cor totalmente diferentes do vidro de base, provocam bolhas ou aparecem no produto final na forma de defeitos metálicos e/ou pontos pretos (**Figura 5 (a)**), manchas, nuvens de bolhas etc. Podem também causar problemas nos fornos de fusão das indústrias vidreiras.

- **Metais não-ferrosos:** tampas em alumínio, anéis de fixação das tampas, embalagens de refrigerantes e de alimentos, peças de estanho, chumbo, Zinco, Níquel, Cobre e Aço Inoxidável. A sua presença no casco final apresenta os mesmos problemas que os metais ferrosos.

- **Orgânicos:** restos de comida, madeira, plástico e têxteis. Este tipo de contaminantes, quando presentes em elevadas quantidades, pode alterar a atmosfera do forno, resultando em reações químicas que alteram a cor ou criam bolhas nos produtos finais.

- **Inorgânicos:** Cerâmicos, porcelanas, pedras, bocados de cimento, vitro-cerâmicos, etc. São os contaminantes mais problemáticos pois têm um ponto de fusão mais elevado que o vidro e podem não fundir, causando defeitos nos produtos de vidro finais e deixando-os com menor resistência (**Figura 5 (b)**).

- **Outros tipos de vidro:** a presença de outros tipos de vidro distintos do tipo de vidro principal e desejado interfere com a qualidade do produto final pois têm pontos de fusão distintos, o que gera um produto final heterogêneo. Por outro lado, a presença de alguns compostos químicos da composição de alguns tipos de vidro também pode interferir.

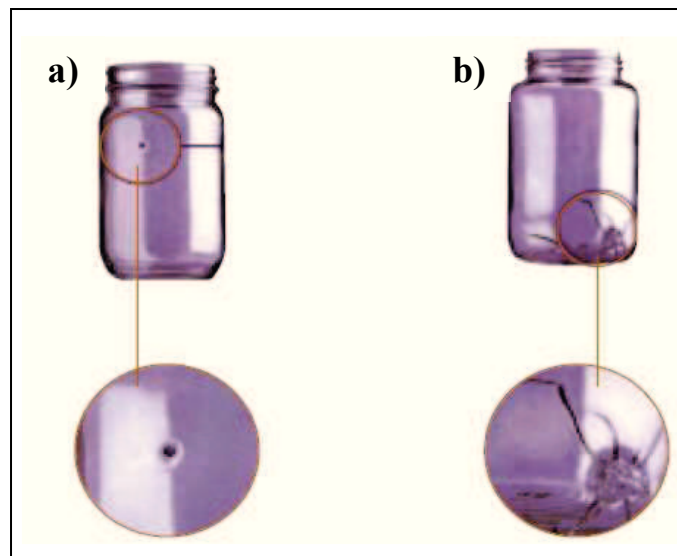


Figura 5: (a) Defeito na superfície devido a uma partícula metálica; (b) Defeito causado por contaminação de cerâmica

(<http://www.abividro.org.br>)

3.2.2.3. Limite de contaminantes

O casco de vidro à saída deve obedecer a especificações do cliente, a especificações da indústria, ou a um padrão para o uso direto na produção de substâncias ou objetos de vidro pela refusão em indústrias de manufaturação de vidro. Pessoal qualificado deve verificar se cada remessa está em conformidade com a especificação adequada.

De acordo com o regulamento (UE) n.º 1179 de 10 de dezembro de 2012, que estabelece os critérios para determinar em que momento o casco de vidro deixa de constituir um resíduo, na aceção da Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, o conteúdo em contaminantes deverá ser o seguinte:

- **Metais ferrosos:** ≤ 50 ppm
- **Metais não-ferrosos:** ≤ 60 ppm
- **Inorgânicos:**
 - ≤ 100 ppm para casco de vidro com um tamanho superior a 1mm
 - ≤ 1500 ppm para casco de vidro com um tamanho inferior a 1mm
- **Orgânicos:** ≤ 2000 ppm

3.2.2.4. Utilização de casco pela indústria vidreira em Portugal

Atualmente a indústria vidreira de vidro de embalagem incorpora cerca de 20% de casco de mistura, na produção de vidro âmbar e entre 50 a 80% na produção de vidro verde (a percentagem incorporada varia consoante o tom de verde pretendido). Se o casco utilizado fosse separado por cores, isto é, casco âmbar e casco verde, a percentagem de casco a incorporar na produção de novas embalagens seria muitíssimo superior. No entanto, visto que o casco separado por cores teria um custo superior, as novas embalagens sofreriam um aumento de custo. Dado que o conceito de sustentabilidade implica não só as vertentes ambiental e social, mas também a vertente económica, as novas embalagens produzidas tornar-se-iam insustentáveis.

Quanto ao vidro transparente, não se incorpora casco de mistura na sua produção uma vez que isso alteraria a sua tonalidade. Assim, para que a utilização de casco reprocessado na produção de novas embalagens de vidro transparente fosse possível, esse casco teria de ser exclusivamente transparente. Uma vez que a separação do casco reprocessado por cores tem custos mais elevados, o casco exclusivamente transparente teria também um custo superior ao casco de mistura. Deste modo a sua utilização na produção de novas embalagens implicaria um encarecimento das embalagens de vidro transparente. Por outro lado, dado que o vidro de embalagem transparente é utilizado essencialmente pela indústria alimentar, e em Portugal as indústrias consumidoras de vidro de embalagem que prevalecem são a indústria vinícola e a indústria da cerveja, é produzido pouco vidro de embalagem transparente em Portugal. Visto que o casco reprocessado tem um custo para as empresas de produção de vidro, a sua incorporação na produção de novas embalagens apenas é compensadora em volume, não compensando portanto a sua utilização na produção de vidro de embalagens transparentes.

Por estas razões, não se incorpora casco reprocessado na produção de vidro de embalagem transparente.

A utilização de casco de vidro no nosso país constitui ainda um problema devido, não só à qualidade do casco e suas diferentes origens, como também à pouca quantidade de casco existente. Este problema deve-se ao facto de a recolha seletiva em Portugal ainda ser pouca e mal feita.

3.3. Betão

3.3.1. Definição

De acordo com Mehta *et al* (2006) e citado por Coutinho (2011), o betão é o material mais consumido no mundo a seguir à água, sendo produzido anualmente cerca de 1 m³ de betão por pessoa.

O betão é produzido a partir de matérias-primas facilmente disponíveis, é um material de utilização simples que apresenta boas características de resistência e durabilidade, tendo-se tornado um material indispensável para a realização de infraestruturas necessárias à sociedade moderna (Damtoft *et al*, 2008).

O betão é o material mais utilizado na construção civil e é composto por uma mistura, devidamente proporcionada, de um ligante hidráulico, areia, pedra e água, além de outros materiais tais como os adjuvantes e as adições. A areia e as pedras são classificadas como agregados finos e agregados grossos, respetivamente, e podem ser obtidos por ação mecânica provocada pelo Homem ou por ação da natureza. Se uma mistura possuir apenas agregados finos ganha a designação de argamassa. Deste modo, pode também afirmar-se que o betão consiste numa mistura de argamassa e de agregados grossos.

A propriedade que os produtos da reação do ligante com a água têm de endurecer, confere à mistura uma coesão e resistência que lhe permite servir como material de construção (Coutinho, 1997).

3.3.2. Componentes do betão

3.3.2.1. Água

A água é usada na mistura de betão com os seguintes objetivos principais: hidratar o cimento, molhar os agregados, permitir a mistura homogénea dos constituintes, contribuir para a consistência e definir a trabalhabilidade do betão (diminuir o atrito interno entre os agregados).

A quantidade de água a usar deve ser muito bem determinada uma vez que, a quantidade de água necessária para conferir uma boa trabalhabilidade ao betão é sempre superior à necessária para hidratar o ligante. No entanto, quanto maior a quantidade de água

utilizada, menor será a resistência à compressão. Assim, deve-se usar a quantidade de água estritamente necessária para hidratar o cimento e para conseguir uma trabalhabilidade adequada da argamassa, assegurando a sua aderência e plasticidade (Oliveira, 2012).

A quantidade de água a utilizar aumenta proporcionalmente quanto mais finos forem os agregados usados e quanto maior for a quantidade de cimento usada, e varia com o grau de humidade e da temperatura ambiente. De acordo com o indicado por Martins e Assunção (2010) e citado por Oliveira (2012), qualquer excesso de água torna a mistura mais porosa e diminui a sua resistência, assim como uma quantidade insuficiente provoca muitas vezes uma mistura imperfeita.

Todas as águas potáveis e ainda as que não o sendo, mas que não tenham cheiro nem sabor podem ser utilizadas na amassadura do betão. Efetivamente, a água de amassadura influi nas propriedades do betão através das substâncias dissolvidas e em suspensão. As substâncias dissolvidas podem afetar as resistências mecânica e química do betão. As substâncias em suspensão podem afetar a compacidade e, especialmente, o crescimento cristalino dos produtos da hidratação do cimento (Coutinho, 1997).

3.3.2.2. Agregados

Os agregados correspondem a aproximadamente 70% dos materiais sólidos incorporados no betão, exercendo influência em várias propriedades desse material de construção, dentre elas destaca-se a durabilidade (Tiecher, 2006). Influenciam ainda a porosidade, a composição granulométrica, a permeabilidade, a forma e textura superficial, a resistência à compressão, a dureza e o módulo de elasticidade. Os agregados para a construção civil são materiais granulares, sem forma nem volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas para uso em obras de engenharia civil (La Serna *et al*, sem data). São geralmente tratados como materiais sem capacidade de coesão, de atividade química quase nula e de enchimento inerte no betão. Estas partículas têm então a função de aumentarem o volume da mistura, reduzindo assim o seu custo.

Os agregados podem ser naturais ou artificiais. Os naturais são os que se encontram de forma particulada na natureza (areia, cascalho ou pedregulho) e os artificiais são aqueles produzidos por algum processo industrial, como as pedras britadas, areias artificiais, escórias de alto-forno e argilas expandidas, entre outros (La Serna *et al*, sem data). Os naturais apresentam, geralmente, uma forma mais arredondada devido aos processos erosivos naturais

enquanto que, os artificiais apresentam-se com uma forma mais angulosa provocada pelos processos mecânicos.

Alguns produtos substitutos aos agregados minerais têm vindo a ganhar destaque, como os reciclados de entulho de demolição, as argilas expandidas (resultantes do cozimento das lamas oriundo do tratamento de esgotos, ou de material argiloso preparado especialmente para esse fim), os resíduos de produtos siderúrgicos (escórias de alto-forno, contudo a sua quantidade disponível é bem limitada), os resíduos da indústria de plásticos para a fabricação de pré-fabricados leves, os resíduos de pneus triturados para a utilização no betão e pavimentos, a areia de brita e a areia marinha. Mas nenhuma outra fonte é tão abundante quanto os próprios agregados minerais (La Serna *et al*, sem data).

As propriedades essenciais que se exige aos agregados são: i) forma e dimensões proporcionadas adequadas; ii) resistência mecânica adequada; iii) propriedades térmicas adequadas; iv) propriedades químicas relativamente ao ligante e às ações exteriores adequadas; v) isenção de substâncias prejudiciais (Fernandes, 2007). Relativamente a este último ponto, as impurezas que se podem encontrar nos agregados estão em grande parte relacionadas com a sua origem, sendo que os agregados sedimentares são os que contêm mais facilmente impurezas tais como, matéria orgânica, sais, argilas e siltes.

3.3.2.3. Cimento

De acordo com a normalização europeia EN 197-1, o cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que ganha presa e endurece por reações e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água.

Segundo Coutinho (1997), a designação de ligante deve-se à propriedade que tem de poder aglomerar uma proporção elevada de materiais inertes, como areias, pedra britada, etc., conferindo ao conjunto grande coesão e resistência, o que os torna aptos a serem utilizados na construção como argamassas e betões. Considera-se hidráulico porque, além de endurecer ao ar é capaz de adquirir elevadas resistências debaixo de água, suportando perfeitamente a sua ação, propriedade muito procurada e apreciada pelos construtores de todos os tempos.

Um cimento que esteja de acordo com a norma europeia EN 197-1 é designado por cimento CEM e se for devidamente misturado com água e agregados, é possível obter-se betão ou argamassa.

Tal como referido por Neville (1995) citado por Coutinho (2006), na área da construção e engenharia civil têm sobretudo interesse os cimentos hidráulicos calcários - isto é, os cimentos hidráulicos em que os principais constituintes são compostos de cálcio. De facto estes cimentos são constituídos sobretudo por silicatos e aluminatos de cálcio e, de um modo geral, podem-se classificar em:

- Cimentos naturais;
- Cimentos *Portland*;
- Cimentos aluminosos (high-alumina).

O ligante hidráulico mais importante e portanto, o mais usual, é o cimento *Portland* artificial. Ganhou o nome de “*Portland*” pois a sua cor e propriedades são semelhantes às rochas da ilha britânica de *Portland*.

Este cimento hidráulico resulta de uma mistura devidamente proporcionada de calcário (carbonato de cálcio), argila ou xisto argiloso (silicatos de alumínio e ferro) e outras substâncias ricas em sílica, alumina e ferro. Estes constituintes são reduzidos a um pó muito fino, que é então sujeito à ação de temperaturas na ordem de 1450 °C, obtidas geralmente em grandes fornos rotativos. A mistura é muito bem homogeneizada e bem dispersa, quer a seco (fabricação do cimento por via seca) quer por meio de água (fabricação por via húmida).

Estes constituintes mineralógicos, devido à ação destas altas temperaturas, reagem quimicamente entre si num processo denominado clínquerização, até à fusão de cerca de 20% destes compostos. Em virtude destes fenómenos químicos e físicos, os produtos da reação, ao arrefecerem, aglomeram-se em pedaços com dimensões variáveis mas geralmente entre os 2 e os 20 mm, chamados *clínquer* (Coutinho, 1997). Este produto é composto essencialmente por 20 a 65% de silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), 10 a 55% de silicato bicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), 0 a 15% de aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e 5 a 15% de aluminoferrato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), e é o principal componente do cimento. Estes componentes cristalizam em elementos mais ou menos individualizados.

Cada um destes componentes do clínquer tem uma influência diferente no betão sendo que, o teor de silicato tricálcico contribui para o desenvolvimento da resistência em idades jovens e final, o teor em silicato bicálcico está envolvido nas resistências em idades posteriores, e o aluminato tricálcico influencia a resistências nas primeiras idades.

O principal constituinte do cimento é então o clínquer, ao qual se juntam adições. Deste modo, o clínquer pode ser definido como o cimento numa fase básica de fabrico, a

partir do qual se fabrica o cimento através da adição de sulfato de cálcio, calcário e/ou escória siderúrgica.

Tal como indicado por Bauer (sem data), o facto de o cimento ser um material fino leva a um aumento da atividade superficial das partículas na hidratação. Deste modo, cimentos mais finos desenvolvem maiores resistências mecânicas nas primeiras idades (3 a 4 dias). No entanto, a velocidade de perda do calor de hidratação, o teor de água para uma mesma trabalhabilidade, a retração e/ou o risco de fissuração, estão também diretamente relacionados com a finura do cimento.

Os betões de cimento *Portland* são suscetíveis de sofrer carbonatação com redução do pH, que dá lugar à *despassivação* das armaduras, de reações álcalis-agregado lentas mas fortemente expansivas, de ataques por ambientes ácidos e de reações expansivas com os sulfatos. Apresentam ainda um desempenho muito limitado a altas temperaturas pois a partir dos 400°C começam a perder a água de constituição, acabando por se desintegrar (Pinto, 2006).

3.3.2.4. Adições e adjuvantes

De acordo com Santos (2008), adições são materiais em pó utilizados na produção das argamassas e betões, com o objetivo de alterar determinadas propriedades do material no estado fresco e/ou endurecido, tornando-o mais manuseável e melhorando as suas características em relação à resistência físico-química. De acordo com a norma NP EN 206-1:2005 existem dois tipos de adições inorgânicas: adições quase inertes (tipo I) e adições pozolânicas ou hidráulicas (tipo II). Como exemplo das primeiras têm-se os fíleres calcários² e os pigmentos e das segundas têm-se as pozolanas, as cinzas volantes, as sílicas de fumo, entre outras.

Ainda de acordo com Santos (2008), os adjuvantes são produtos químicos que se adicionam ao traço das argamassas, com a finalidade de melhorar as suas características relativas à trabalhabilidade, tempo de presa, plasticidade, resistência mecânica, permeabilidade, viscosidade, aparência e durabilidade.

² Matéria-prima obtida através da moagem fina de calcário, basalto, entre outros e que, devido à sua granulometria, melhora propriedades das argamassas e betões tais como a trabalhabilidade, a capilaridade, a densidade, a tendência à fissuração e a permeabilidade de argamassas e betões.

Os primeiros adjuvantes surgiram em 1938 no entanto, atualmente, e de acordo com Pinto (2006), são assinaláveis os progressos na química dos adjuvantes, obtendo-se produtos que permitem reduções significativas da água de amassadura e o aumento substancial da plasticidade e trabalhabilidade das massas frescas. Certos adjuvantes garantem a obtenção de um grau de hidratação mais rápido e profundo do cimento pela redução do número de partículas não hidratadas, dando conseqüentemente lugar à formação mais compacta e mais resistente do produto final (Pinto, 2006).

Como exemplos de adjuvantes temos os plastificantes, retentores de água, introdutores de ar e promotores de aderência.

3.3.3. Pozolanas em betão

As pozolanas são produtos naturais ou artificiais constituídos essencialmente por sílica e alumina (Coutinho, 1997). As pozolanas naturais são rochas de origem vulcânica provenientes de magmas geralmente ácidos, ou seja, ricos em sílica, e que solidificaram rapidamente durante uma erupção e que ficaram no estado amorfo, ou criptocristalino (Coutinho, 1997). São geralmente constituídas por uma mistura mais ou menos homogênea de materiais argilosos, limos e areias. Foram descobertas na localidade de Pozzuoli nas proximidades do monte Vesúvio (Itália), de onde adquiriram o seu nome, e são provenientes do rápido arrefecimento de cinzas vulcânicas daquela mesma zona (cinzas pozolânicas). Mais tarde, este material começou a ser produzido industrialmente a partir de cinzas volantes de processos de queima industrial³ ou de argilas calcinadas⁴. Segundo Coutinho (1997), as pozolanas artificiais são obtidas pela criação duma instabilidade de estrutura interna à custa da saída de iões OH⁻ da rede cristalina dos minerais argilosos, pela ação da temperatura (geralmente entre os 500 e 900°C) o que aumenta a porosidade da partícula e, portanto, a superfície ativa. No entanto, a temperatura deve ser inferior àquela a que a rede começa a reduzir a sua energia por fusão. Como exemplo de pozolanas artificiais tem-se as cinzas volantes, sílica ativa, argilas calcinadas, cinzas de casca de arroz e os finos resultantes de britagem, ou “pó de pedra”.

³ São materiais finamente divididos que resultam da combustão de carvão pulverizado ou granulado com atividade pozolânica (Netto, 2006).

⁴ São materiais provenientes da calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500°C e 900°C, de modo a garantir a sua reatividade com o hidróxido de cálcio (Netto, 2006).

As pozolanas mais comuns são de cor clara, mas em função dos óxidos metálicos que contenham podem ter colorações que variam desde o esbranquiçado até ao cinzento-escuro, incluindo variedades avermelhadas e rosa.

Quimicamente, e tal como já referido acima, as pozolanas são materiais siliciosos ou silico – aluminosos, cuja sílica se encontra na forma reativa. Devido à sua riqueza em silicatos vítreos são consideradas rochas sedimentares de natureza ácida.

De acordo com Mehta (1987) citado por Netto (2006), com o advento do cimento *Portland* no século XIX, o cimento pozolânico (ou mais corretamente cal-pozolana) deixou de ser utilizado na fabricação de betão estrutural, pois o cimento *Portland* endurece e adquire resistência a uma taxa mais elevada.

O material pozolânico por si só possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante. No entanto, contem constituintes que à temperatura ambiente e em presença da água, se combinam com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento, originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes, tais como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

Ora, tal como referido no capítulo 3.3.2.3, um dos constituintes do cimento *Portland* é o hidróxido de cálcio e este não possui características cimentícias. Deste modo, quando adicionadas pozolanas ao cimento, o hidróxido de cálcio reage com as pozolanas, resultando numa produção extra de silicatos de cálcio hidratados. Isto leva claramente, a um melhoramento das características cimentícias do cimento e à resistência do betão.

As pozolanas são aplicadas em betão especialmente com duas finalidades: baixar o calor de hidratação do cimento, o que acarreta benefícios ao nível da retração, e evitar a formação do sulfoaluminato expansivo, propriedade importante no betão sujeito à ação dos sulfatos. Por outro lado, os betões obtidos com a adição de pozolanas têm melhor comportamento mecânico, pois apresentam maior teor em silicatos cálcicos e são mais estáveis do ponto de vista químico pois contém menor quantidade de hidróxido de cálcio. Melhora ainda a durabilidade do betão uma vez que, contribui para a inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada.

Segundo Jalali (1998) e referido por Pinto (2006), uma vez que as reações de carácter pozolânico destas adições só se verificam após a formação do hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , que decorre da hidratação do cimento, os produtos de reação que se obtém (do tipo C-S-H) são precipitados nos vazios da estrutura, primeiramente constituída pelos produtos de hidratação do cimento. Ainda de acordo com o mesmo autor, as partículas de pozolana, embora que sejam mais lentas a reagir que as partículas do cimento, quando são dispersadas

na massa do betão, geram um grande número de pontos de nucleação à volta dos quais se podem formar ou precipitar os produtos de hidratação do cimento. Este mecanismo torna a pasta mais homogénea e mais densa, o que promove posteriormente, a reação entre a sílica reativa das pozolanas com o hidróxido de cálcio advindo da hidratação do cimento.

É de focar ainda que se verifica o efeito físico complementar de preenchimento dos vazios, o que traz vantagens na durabilidade do betão uma vez que a porosidade acessível representa uma porta aberta para a entrada dos agentes líquidos e gasosos, capazes de promover alterações químicas no interior do betão.

Os materiais pozolânicos começam a não ser suficientes para prover toda a procura da indústria de construção e, atualmente a indústria de construção civil procura alternativa para satisfazer as necessidades crescentes de utilização de cimento e da produção de betão.

3.3.4. Reatividade pozolânica

Para que haja reatividade pozolânica, isto é, capacidade de o material designado por pozolana se combinar com o hidróxido de cálcio, é necessário que a sílica e a alumina não estejam em elevado grau de cristalinidade: o quartzo e o coríndon são perfeitamente inertes. A reatividade da pozolana está portanto, ligada à sua estrutura interna: ela será tanto maior quanto mais afastado estiver o produto do estado cristalino (Coutinho, 1997).

De acordo com Fragata *et al.* (sem data) um material pozolânico típico deve apresentar duas características essenciais: possuir um elevado conteúdo em sílica no estado amorfo e ter uma elevada superfície específica. Assim, e segundo Coutinho (1997), é habitual que a superfície específica destes materiais atinja valores duplos ou triplos dos do cimento.

Como já foi estudado no capítulo 3.1.5, a estrutura dos silicatos (bem como dos aluminatos) resulta do arranjo de tetraedros nos quais o oxigénio ocupa os vértices e os iões de silício ou alumínio, o centro. Os tetraedros que se encontram à superfície são os mais vulneráveis e é por aí que começam as reações: um vértice livre tende a ligar-se a iões OH^- por atração do ião central Si^{4+} ou Al^{3+} o que provoca o desequilíbrio do tetraedro que fica ligado ao resto da estrutura apenas por uma aresta em torno da qual pode girar (Coutinho, 1997). Assim, a pozolana atua como ponto de nucleação dos produtos de hidratação do cimento, ou seja, serve como superfície para a sedimentação dos produtos provenientes desta hidratação.

Segundo John *et al.* (2003) citado por Junior *et al.* (2011), os principais produtos da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio são o silicato de cálcio e o aluminato de cálcio hidratados.

A pozolana consome o hidróxido de cálcio, dando origem a uma estrutura cristalina rígida, ou seja, à medida que vai havendo liberação de hidróxido de cálcio, este vai passando para a pozolana, formando-se C-S-H, o que se caracteriza como "efeito pozolânico". Mas a pozolana não reage só com o hidróxido de cálcio mas sim também com o silicato bicálcico do cimento, acelerando extraordinariamente a sua hidratação e endurecimento (Coutinho, 1997).

4. Caso de estudo

4.1. Tecnologias da Vidrociclo

A seguir são descritos os diversos equipamentos existentes na unidade fabril da empresa Vidrociclo, bem como o seu princípio de funcionamento.

Silos: Estes silos têm o propósito de receber o casco de entrada, isto é, a matéria – prima que irá alimentar a linha da fábrica. Cada silo tem uma capacidade de 40 toneladas o que significa que cada um é capaz de manter a fábrica a funcionar durante cerca de 1 hora, ou seja, ambos garantem a alimentação da fábrica durante 2 horas.

Por vezes objetos grandes tais como garrações de plástico, grandes pedaços de madeira, caixas, etc., vêm misturados com o casco de vidro e criam obstáculos à descarga descendente normal do vidro através dos silos, e prejudicando a alimentação da linha de produção. Para evitar esta situação é essencial a existência de uma grade na entrada dos silos, evitando a passagem de objetos de grandes dimensões para dentro dos mesmos. Esta grade ao longo do tempo acumula resíduos pelo que tem de ser limpa manualmente.

Dado que a tela transportadora sobre a qual os silos descarregam os resíduos é comum aos dois e tem um ângulo positivo, isto é, tem um sentido ascendente, o primeiro silo é colocado mais abaixo que o segundo silo. Deste modo a altura de queda dos resíduos é a mesma para ambos os silos e evita-se assim a quebra excessiva do vidro. (**Figura 6**)

Como o casco pode vir molhado e aderir às paredes dos silos, estes são providos de um vibrador elétrico colocado nas suas paredes exteriores de modo a facilitar a queda do casco.

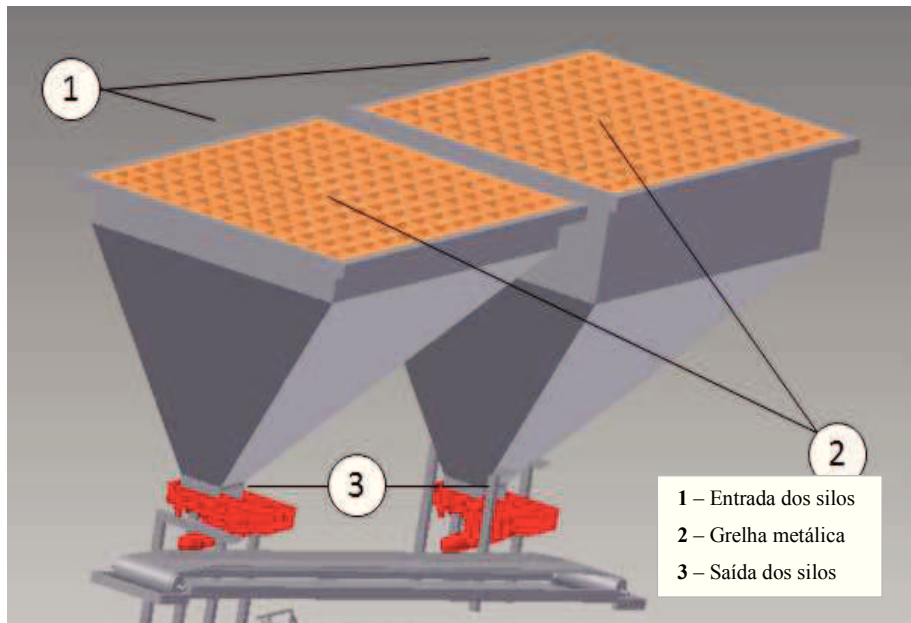


Figura 6: Esquema de silos de entrada.

(Adaptado de Maltha Group (sem data (a)))

Magnéticos/ ímanes: Este tipo de equipamento tem o objetivo de remover materiais ferrosos existentes no fluxo de vidro. Existem dois tipos de magnéticos, os rotativos e os fixos, e o tipo de magnético a usar bem como a altura a que estão colocados da tela transportadora, depende do tamanho dos resíduos por ela transportados.

Os ímanes rotativos são constituídos por uma correia magnética, colocada perpendicularmente à tela transportadora dos resíduos, que atrai os materiais ferrosos e os transporta para fora da tela transportadora, onde o campo magnético criado pelo íman deixa de se fazer sentir (**Figura 7**). Quanto aos ímanes fixos, tal como o próprio nome indica, não possuem qualquer tipo de movimento pelo que exigem que sejam regularmente limpos para retirar os compostos ferrosos que agarram.

Na Vidrociclo existem três magnéticos rotativos e cinco fixos, colocados em diferentes pontos da fábrica. O primeiro é um íman rotativo e é o que está colocado a uma distância maior da tela transportadora (a cerca de 30 cm) uma vez que nesta fase inicial aparecem materiais ferrosos de grandes dimensões (por exemplo latas de tinta). Os restantes ímanes são colocados progressivamente a alturas mais baixas pois, ao longo do processo produtivo os resíduos vão ficando cada vez com dimensões mais pequenas, pelo que é conveniente que os ímanes sejam colocados a alturas inferiores, ficando assim mais perto dos resíduos.

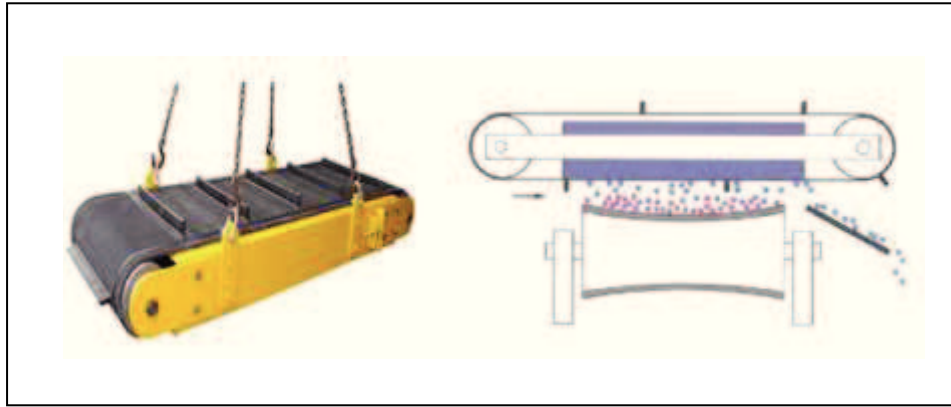


Figura 7: Esquema do funcionamento de um magnético rotativo.

(Adaptado de Maltha Group, sem data (b))

Crivos: Os crivos são utilizados para separar granulometricamente o casco de vidro, isto é, separá-lo em diferentes frações.

Na Vidrociclo existem três crivos. O primeiro é um **crivo de dedos** (ou crivo de pentes) que é usado para separar a primeira fração de resíduos, e que tem a vantagem de separar o material sem quebrar os pedaços maiores e estreitos devido ao movimento ascendente e descendente, não linear dos “dedos” do crivo (enquanto uns sobem outros descem). O segundo é um **crivo de telas** do género Flip-flop, isto é, possui uma estrutura ondular que impede a acumulação de resíduos nos espaços e são de borracha ou plástico altamente resistente ao desgaste, que lhes confere flexibilidade suficiente ao movimento ascendente e descendente não linear. Consiste num sistema de massa única com acionamento e movimentos oscilatórios circulares e possui travessas adjacentes, às quais estão fixadas esteiras de peneiração.

Este tipo de crivos apresenta diversas vantagens nomeadamente, a aceleração elevada proporciona uma desagregação intensiva e uma rápida segregação do material e, ao mesmo tempo, chega uma maior quantidade de produtos finos da peneiração às aberturas da malha do que em crivos convencionais. O resultado é um elevado desempenho específico e uma redução de grãos aderentes devido ao efeito trampolim.

Quanto ao terceiro crivo, também é um **crivo de telas** mas com a particularidade de ser de separação dupla, ou seja, divide os resíduos em três frações. A parte superior do crivo consiste num crivo de telas fixo, enquanto que a parte inferior é um crivo de telas do género Flip-Flop.

Ciclones: Os ciclones são utilizados numa fábrica de reciclagem de vidro para remover os contaminantes leves presentes na matéria-prima nomeadamente, papéis, plásticos, rótulos, etc. É importante que estas impurezas sejam removidas antes das máquinas óticas pois a existência de etiquetas e rótulos no vidro leva à rejeição de vidro por estas máquinas.

Este tipo de equipamentos usam a sucção de ar para aspirar as impurezas leves que, uma vez aspiradas e tendo em conta que se utiliza uma técnica de vacuum, têm de ser descarregadas e o ar tem de ser expulso. Quando o ar entra na câmara do ciclone juntamente com os contaminantes, gera-se um efeito de força centrífuga em que o fluxo de ar é sujeito a um movimento de rotação que gera forças de separação muito elevadas. Assim, dentro da câmara do ciclone os contaminantes aspirados (mais pesados que o ar) caem para baixo e o ar sai pelo lado oposto de onde entrou (**Figura 8**). O ar ao sair passa por um filtro onde é purificado antes de ser expulso para o exterior.

Na Vidrociclo existem três ciclones com sete bocas de aspiração distintas e colocadas em diferentes pontos da fábrica.

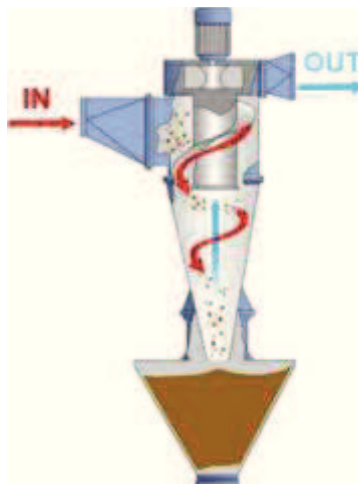


Figura 8: Esquema do funcionamento de um ciclone.

Britador: O britador é o equipamento responsável por partir os pedaços de vidro grandes nomeadamente, gargalos e fundos de garrafas, bem como garrafas inteiras.

O britador existente na Vidrociclo é um britador de rolos e consiste em dois rolos dispostos paralelamente, que rodam ambos para o centro e entre os quais existe um espaço de cerca de 20 mm. Os rolos são feitos de aço duro e cobertos com fios de soldadura para impedir desgaste rápido. O eixo de um dos rolos é fixo enquanto que o do outro tem um movimento tipo mola que confere alguma liberdade de variação da distância entre os rolos, e

que permite evitar que o apoio parta quando pedaços de material grandes ficam presos entre os rolos (**Figura 9**).

Este tipo de britador tem a vantagem de diminuir a fração de finos pois, devido ao espaço existente entre os rolos, o vidro é partido mas não é triturado.

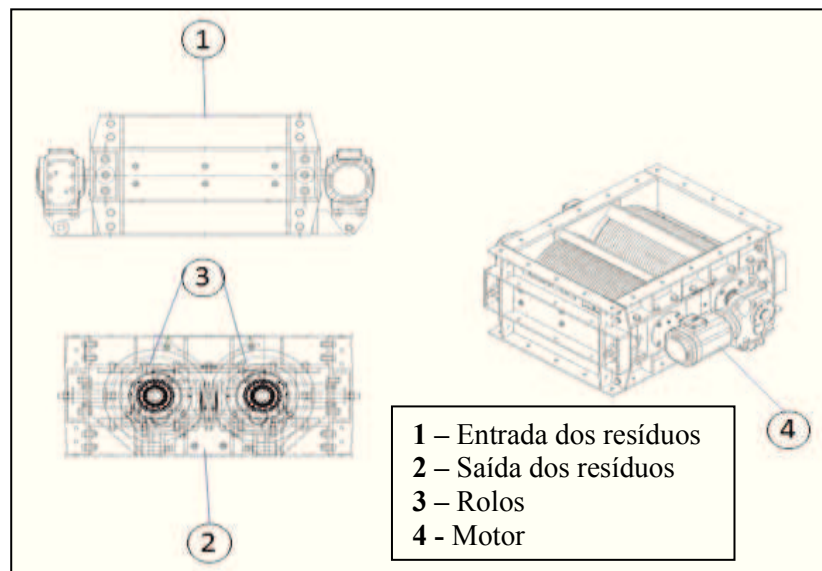


Figura 9: Esquema representativo de um britador/ moinho de rolos.

(Adaptado de Fonte Maltha Group, (sem data (a)))

Equipamentos de correntes indutivas: Ao contrário dos metais ferrosos, os metais não-ferrosos não são atraídos por ímãs magnéticos. Sendo assim têm de ser usados outro tipo de tecnologias nomeadamente as máquinas de correntes induzidas.

Estes equipamentos permitem separar as partículas não ferrosas existentes no fluxo de casco de vidro, através da indução de um campo magnético alternado. A variação deste campo magnético é provocada pela rotação rápida (milhares de rotações por minuto) de um tambor magnético que está dividido em fatias (como um bolo), em que em cada uma existe um polo diferente (+/-). Isto induz campos magnéticos nos metais existentes no casco. Estes campos magnéticos criados nos metais interagem com o campo magnético fonte, gerando forças de repulsão unicamente entre as partículas não-magnéticas. Uma vez que o vidro não sofre com este efeito flui normalmente, enquanto que as partículas não-ferrosas são ejetadas para fora do fluxo.

Na **Figura 10** está esquematizado o funcionamento deste tipo de equipamento.



Figura 10: Funcionamento de uma máquina de corrente induzida.

Máquinas de escolha ótica: Este tipo de máquinas são usadas na remoção do contaminante mais problemático existente no casco de vidro: os CPS (diminutivo de *ceramic, porcelain and stones*), isto é, materiais cerâmicos, porcelanas e pedras.

Existem dois tipos de máquinas de escolha ótica, as de laser e as de câmara, que usam respetivamente, luz laser e luz visível. As máquinas que funcionam a luz laser apenas medem a luz ou a ausência de luz, isto é, apenas detetam o preto e o branco. Já as máquinas que operam com luz visível medem a presença e ausência de luz mas também a cor.

Seja qual for o tipo de equipamento o princípio de funcionamento geral é o mesmo e pode ser compreendido através da **figura 11** apresentada a seguir.

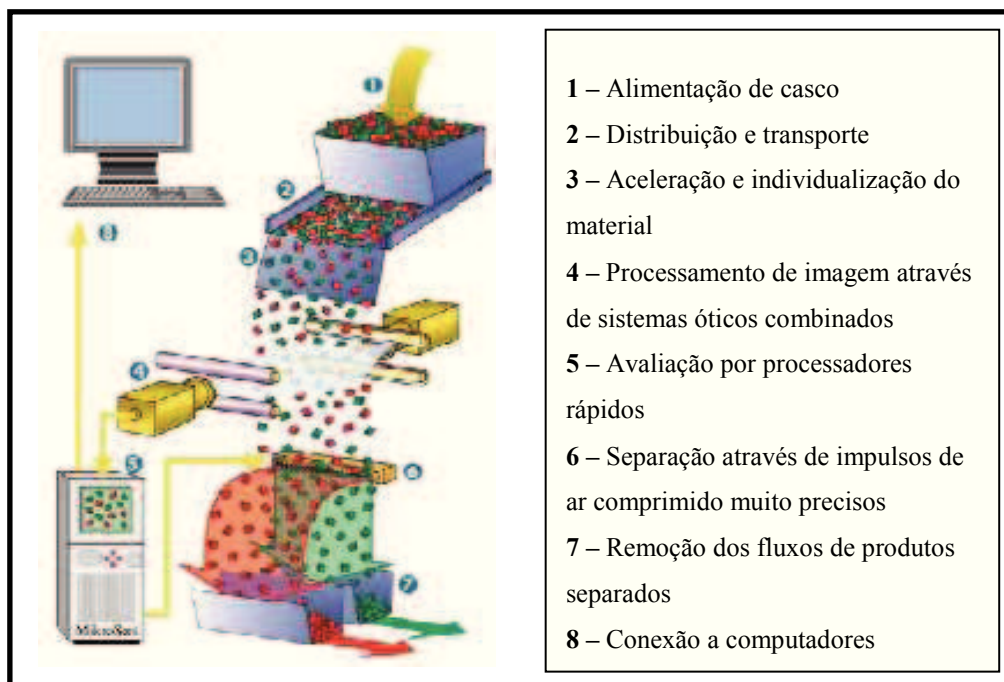


Figura 11: Esquema ilustrativo do funcionamento das máquinas de escolha ótica.
(Adaptado de Maltha Group (sem data (a)))

A calha vibrada (2) alimenta a unidade com o casco de vidro que, devido à gravidade é espalhado numa calha de alimentação inclinada (3). O casco é assim mais individualizado devido à aceleração. Na extremidade da rampa os estilhaços são irradiados com laser ou com luz visível, conforme o tipo de máquina ótica. No caso das máquinas que funcionam a laser, se for detetado um material opaco a câmara de laser determina a sua localização exata (4) e um sistema eletrónico avalia a sua posição (5). Os bicos de ejeção (6) são ativados com extrema precisão e, exatamente no momento certo sopram o contaminante.

Já no caso das máquinas que funcionam a luz visível, quando os estilhaços são atingidos por essa mesma luz, a câmara existente no lado oposto tira fotografias ao material que passa (4). As partículas de vidro deixam a luz passar e a imagem adquire a tonalidade desse mesmo vidro: verde, âmbar, azul, transparente e, em alguns casos, vermelho. A unidade de processamento de imagem (5) avalia a cor de acordo com as referências definidas e tudo o que não esteja incluído nesta gama de cores é rejeitado pelo sopro de ar (6). Uma partícula de cerâmica ou porcelana quando é atingida pela luz branca não deixa trespassar a luz, pelo que a câmara apenas deteta escuridão, a imagem tirada será preta e o computador (8) entenderá esta informação como uma partícula “não vidro”.

Os jatos de ar são controlados pela válvula da unidade de controlo que recebe a informação de rejeição da unidade de processamento de imagem. As imagens não só indicam a cor como também o tamanho do estilhaço e, conforme o tamanho deste é possível ativar diversas válvulas em simultâneo. Os bicos de ejeção são tao precisos que os contaminantes são removidos com muito pouca perda de casco e o resto do casco, livre de contaminantes, continuam ao longo do transportador (7).

Em casos em que se pretende vidro de apenas uma determinada cor, as máquinas óticas a luz visível são programadas apenas para essa mesma cor e todas as outras cores serão rejeitadas. Existem ainda algumas que têm também a capacidade de separação de vidros com diferentes temperaturas de fusão, isto porque estes vidros refletem a luz incidente com uma tonalidade diferente da do vidro normal.

A vibração constitui um problema para a eficiência das máquinas óticas pois pode afastar o material da sua rota prevista pela máquina e o sopro de ar não lhe acertar. Por isto, os geradores de vibração das calhas vibradas são colocados sob blocos de borracha que amortecem a vibração. O material quando chega às máquinas óticas já deve ir livre de materiais ferrosos e não ferrosos, de materiais leves e de lixo grosseiro.

Na Vidrociclo existem nove máquinas de escolha ótica sendo que quatro funcionam a laser e as restantes a luz visível.

4.2. Processo Produtivo da Reciclagem de Vidro na Vidrociclo

O processo produtivo na Vidrociclo é composto por uma sequência de subprocessos e operações que, uma vez aplicadas no casco de vidro proveniente da recolha seletiva, transformam uma matéria-prima secundária (reciclada) de eleição para fusão na indústria vidreira: **Receção do casco de matéria-prima nas instalações; Seleção granulométrica; Aspiração; Detecção ótica e Controlo de Qualidade.**

É então o conjunto destas operações que forma o processo produtivo da empresa e que é a seguir explicado detalhadamente.

O processo inicia-se quando os resíduos são trazidos para a unidade industrial através de camiões de transporte de granéis sólidos, trazendo estes até 40 ton em peso bruto, ou seja, cerca de 26 ton em peso líquido (14 ton de tara). Seguidamente são pesados na báscula e descarregados na zona de acumulação de matérias-primas não sendo diferenciado (a não ser que seja importado). São avaliados quanto ao nível de contaminação existente, de forma a determinar os parâmetros de controlo de produção. A movimentação de stocks de resíduos é realizada através de uma pá carregadora industrial.

Os resíduos são introduzidos pela pá carregadora nas torvas de descarga ou silos. Estes silos, por sua vez, descarregam os resíduos gradualmente sobre um tapete transportador ascendente, por meio de um canal vibrante instalado por baixo do depósito. Sobre o transportador ascendente existe uma unidade de remoção de impurezas de metais ferrosos, por via duma **correia magnetizada** (magnético rotativo). As impurezas ferrosas, uma vez retiradas ao caudal principal de resíduo a valorizar, são encaminhadas para um contentor adequado para escoamento para a indústria siderúrgica.

No final do transportador ascendente existe uma primeira estação de **escolha manual**, denominada de pré-escolha manual, onde um transportador de tela de baixa velocidade, permite a intervenção manual de um escolhedor que, manualmente retira do tapete as impurezas mais grosseiras e com maiores dimensões (sacos de plástico, pedras grandes, sucata de ferro, etc.). Estas impurezas são devidamente encaminhadas para uma câmara de descarga, através de um transportador de refugos para posterior envio para aterro sanitário.

Após esta estação manual segue-se um primeiro crivo, sendo este um crivo de dentes e sobre o qual é descarregado o resíduo, que passa a ser separado em duas frações, uma superior

a 35 mm e outra inferior a 35 mm. A fração superior a 35 mm é encaminhada para uma tela transportadora de baixa velocidade, que permite a intervenção de um ou dois escolhedores, conforme o grau de rigor da escolha, e destina-se à eliminação por detecção visual de impurezas de dimensões acima de 35 mm. Os resíduos eliminados neste estágio são encaminhados para uma câmara de descarga através de um transportador. Seguidamente a esta escolha, o material correspondente à fração superior a 35 mm é descarregado no britador/moinho de rolos, constituído por dois rolos paralelos que esmagam os resíduos em dimensões mais pequenas. Quanto ao material correspondente à fração inferior a 35 mm, é descarregado sobre um segundo crivo vibrante, desta vez um crivo duplo do tipo Flip – flop.

Depois desta crivagem resultam então três frações: uma superior a 22 mm, uma inferior a 22 mm e uma outra inferior a 10 mm. As duas primeiras seguem cada uma na sua respetiva tela transportadora, passando (cada uma) por um magnético rotativo para a remoção de materiais ferrosos, seguido de um separador de corrente induzida para remover os contaminantes não-ferrosos. Estas impurezas, uma vez retiradas, são encaminhadas para contentores apropriados, para escoamento para as indústrias siderúrgicas e do alumínio, com vista a reciclagem. Na sequência da passagem nesta máquina, o material passa por duas máquinas equipadas de canais vibrantes, sobre os quais existem bocas de aspiração ligadas a aspiradores ciclónicos que eliminam por aspiração as impurezas leves (papel, tampas plásticas, etc.). Estas impurezas, por sua vez, são escoadas para um contentor apropriado e posterior envio para aterro sanitário, dado não ser possível proceder à sua reciclagem. Essas máquinas utilizam tecnologia laser (eliminação de impurezas cerâmicas) e tecnologia de correntes indutivas (eliminação de impurezas não-ferrosas), permitindo assim a eliminação automática da maioria das impurezas cerâmicas e não-ferrosas e trazendo o material para níveis de contaminação exigidos pela indústria do vidro de embalagem.

Respetivamente à fração de 10 mm resultante da crivagem anteriormente referida, segue para um terceiro crivo do tipo Flip – flop simples de onde resultam dois fluxos de materiais: um composto por resíduos inferiores a 6 mm e que segue diretamente para o produto final, e um fluxo com material superior a 6 mm que será sujeito à passagem por duas máquinas óticas para remoção de cerâmicas, e por duas bocas de aspiração localizadas sob as calhas vibrantes dessas mesmas máquinas. O material rejeitado por estas segue diretamente para o monte de refugos.

Todo o material aproveitado pelas máquinas óticas a funcionarem nas frações de resíduos superiores e inferiores a 22 mm, passa por uma terceira estação manual de onde segue para o produto final. Quanto aos resíduos rejeitados por estes equipamentos, contêm

percentagens significativas de vidro e assim, com vista à otimização do rendimento da unidade industrial, e com o objetivo de reduzir a fração final para aterro sanitário, são encaminhados para um anel secundário de escolha automática, integrando um conjunto de equipamentos que consiste num canal vibrante duplo, uma boca de aspiração de materiais leves e três máquinas utilizando tecnologia laser (eliminação de impurezas cerâmicas) e tecnologia de correntes indutivas (eliminação de impurezas não-ferrosas). Este estágio secundário permite a eliminação automática de quase todas as impurezas cerâmicas e não-ferrosas, em maior percentagem, existentes nos refugos provenientes do fluxo primário. Desta forma é possível, em fluxo contínuo, reduzir significativamente a fração final para aterro, sendo que o produto selecionado por este anel secundário é descarregado diretamente no produto final ou pode ainda ser recirculado de volta ao início do processo, caso se considere não estar bom o suficiente, sendo reintroduzido antes do primeiro crivo vibrante. O material rejeitado segue para o monte de refugos.

Relativamente ao produto final, no final da sua passadeira transportadora existe uma válvula através da qual são separadas amostras regulares correspondendo a 1% (10 kgs em cada tonelada), para controlo de Qualidade, onde são medidos, por verificadores de Qualidade treinados, os níveis de impurezas após tratamento. São feitas diariamente análises de carência química de oxigénio (CQO), de refugo, de granulometria, de contaminação, do casco importado, da cor, de humidade, de perda de ignição (LOI) e da matéria-prima. O produto acabado, consoante a sua especialização, é dirigido para o chão através, alternativamente, dum transportador pivotante por forma a permitir colocar os vários tipos de produto em pilhas diferentes. Todo o material que não se encontra com as especificações do cliente é reintroduzido no processo inicial

O stock de produto acabado e empilhado no exterior é manuseado através de pá carregadora industrial e é ordenado em pilhas de stock para escoamento, através de camiões de transporte de granéis sólidos para os clientes da indústria vidreira.

Os dados de produção da Vidrociclo dos últimos quatro anos estão esquematizados no **Gráfico 13** presente no **Anexo I**. Como se pode verificar com a análise desse mesmo gráfico a produção anual da Vidrociclo tem vindo a aumentar, sendo que a previsão para os próximos anos é que essa mesma tendência se mantenha.

4.3. Valorização do resíduo das máquinas óticas

4.3.1. Caracterização do resíduo

O refugo das máquinas de escolha ótica é composto por duas frações, uma fração grossa (>10 mm) e uma fração fina (0 a 10mm), que correspondem a 80% e 20% de refugo total, respectivamente.

Em termos físicos, o refugo das máquinas óticas é constituído essencialmente por vidro sendo que este corresponde a uma parcela total de 85 a 90% do resíduo. Os outros 10 a 15% correspondem a quantidades variáveis de porcelanas, pedras, opalas, compostos não ferrosos e ferrosos, compostos orgânicos e pedaços de espelho.

Quanto à composição química, verifica-se que o resíduo das máquinas de escolha ótica possui elevados teores em sílica (72%), Na₂O (12%) e CaO (11%), revelando os elementos restantes teores baixos. Estes valores foram baseados em estudos anteriores solicitados pela Vidrociclo a entidades laboratoriais e podem ser consultados na **Tabela 13** presente no **Anexo I**. Sabe-se ainda que a massa específica do resíduo é de 1,4 ton/m³.

Em termos granulométricos o resíduo das máquinas óticas é, de um modo geral, constituído por cerca de 40 a 45% de partículas inferiores a 8 mm, 15 a 20% de partículas entre os 8 e os 11,2 mm, 15 a 20% de partículas entre 11,2 a 16mm, 10 a 15% de partículas entre os 16 e os 22,4 mm, e cerca de 10% de partículas superiores a 22,4 mm. Estes valores são baseados em análises granulométricas efetuadas no laboratório de análise da Vidrociclo.

4.3.2. Alternativas possíveis à deposição em aterro

O destino normal dos resíduos advindos das máquinas óticas é o aterro sendo que, a quantidade de resíduos depositada em aterro pela Vidrociclo estima as 20 000 toneladas anuais. No entanto a busca por alternativas à sua deposição em aterro por parte da Vidrociclo tem sido incansável.

A acumulação progressiva de resíduos de vidro na nossa sociedade e consequentes questões ambientais associadas, têm desencadeado alguma preocupação e incentivado vários estudos com o intuito de avaliar possíveis formas de revalorizar este material. Tal como já foi referido no capítulo 3.2, são várias as hipóteses para revalorizar este tipo de resíduo. Em alguns estudos anteriormente realizados pela Vidrociclo, estudou-se a sua incorporação em pasta cerâmica, em vidro cerâmico e em aplicações rústicas.

Por outro lado, tem-se considerado também a hipótese de utilizar resíduos de vidro na construção civil nomeadamente, na substituição parcial de agregados finos em betão; como matéria-prima na produção de cimento; e como substituição parcial do cimento em betão.

É essencialmente nesta vertente de utilização de resíduos de vidro em betão que se insere o presente estudo, sendo que este se foca especialmente, na possibilidade de utilização dos resíduos advindos das máquinas óticas como substituição parcial de cimento em betão de alta resistência.

5. Metodologia

5.1. Incorporação de resíduos de vidro em betão

A produção de betão é um dos maiores setores produtivos em Portugal (e no mundo), sendo por isso um dos maiores consumidores de recursos naturais e de energia desde a fase de extração de matérias-primas, passando pela produção de cimento e betão e transporte de materiais. Segundo Mehta et al (2006) e citado por Coutinho (2011), a indústria do betão consome anualmente, além do cimento, 9 biliões de toneladas de areia e rocha e 1 bilião de toneladas de água de amassadura. A exploração, o processamento e o transporte de uma imensa quantidade de agregado, acrescentada aos biliões de toneladas de matéria-prima necessária para o fabrico do cimento, consomem grande quantidade de energia e afetam negativamente o sistema ecológico.

Segundo Coutinho (2011), a produção de cimento é responsável por 5 a 8% das emissões de CO₂ produzidas pelo Homem. De facto na produção de cimento *Portland* é necessário utilizar combustível, em geral carvão, para se atingirem temperaturas de clínquerização de cerca de 1500°C. Além disso, durante o processo, uma das matérias-primas, o calcário, decompõe-se quimicamente libertando CO₂. Assim, o cimento *Portland* é produto de uma indústria não apenas correspondente a um elevado consumo de energia (4 GJ/t de cimento), mas também responsável por grandes emissões de CO₂.

Os betões hidráulicos, constituídos na sua maioria por cimento *Portland*, por serem os materiais de construção mais usados a nível mundial, têm um enorme impacte ambiental e no desenvolvimento sustentável. Torna-se então imprescindível o estudo da utilização de materiais alternativos aos comuns, de forma a reduzir o impacte ambiental causado pela construção civil. A possibilidade de esses materiais alternativos serem resíduos advindos de outros processos industriais, torna a situação ainda mais favorável pois, para além de se

diminuir a problemática ambiental da construção civil, também se atenua a questão da deposição excessiva de resíduos em aterros sanitários.

Diversos subprodutos industriais de origem siliciosa ou alumínica, bem como alguns materiais pozolânicos, têm sido cada vez mais usados na indústria de cimento e betão. A introdução destes materiais tem vindo a gerar resultados satisfatórios e encorajadores de novos estudos, principalmente no que toca à durabilidade e propriedades mecânicas do betão.

5.1.1. Como agregado em betão

A investigação sobre o uso de vidro moído como agregado em betão data de muitas décadas. Muitos estudos foram efetuados nas décadas de 60 e 70 com o intuito de se tentar usar resíduos de vidro como agregado em betão no entanto, todos eles revelaram que o betão com estes resíduos fissuraram. Como exemplos destes estudos tem-se os estudos de Pike et al., 1960; Schmidt and Saia, 1963; Phillips et al., 1972; Johnston, 1974; supracitados por Shi *et al* (2007).

Duas décadas mais tarde, o uso de resíduos de vidro como agregados em betão voltou a estar sob investigação como resultado da acumulação contínua de resíduos de vidro e das suas conseqüentes questões ambientais, bem como devido aos altos custos da sua deposição em aterro. Perkins (2007) realizou um estudo no qual produziu duas argamassas, uma com 0% e outra com 100% de substituição de areia por vidro moído, tendo concluído que a trabalhabilidade fica debilitada significativamente e a resistência à compressão é favorável comparativamente à argamassa de controlo. Um ano depois os autores Zainab Ismail e Enas Al-Hashmi realizaram um estudo com argamassas com 0, 10, 15 e 20% de substituição de areia por vidro moído. Os seus resultados permitiram concluir que a consistência das argamassas com resíduos de vidro diminuiu com o aumento do conteúdo de vidro, o que se acredita ser provocado pela forma dos grãos de vidro. Apesar deste decréscimo as argamassas têm uma boa trabalhabilidade. A percentagem ótima de resíduos de vidro que deu os valores de resistência à compressão e flexão máximos foi a de 20% e houve uma redução da reação álcali-silica. Já o autor Márcio Trentini realizou um estudo mais recente em 2012 no qual as argamassas em estudo tinham percentagens de substituição de vidro de 0, 10 e 15%. Obteve valores máximos de compressão na argamassa com 10% de adição enquanto que os resultados de resistência à tração foram mais favoráveis na argamassa com 15% de adição.

Inúmeros outros estudos têm sido realizados ao longo das últimas duas décadas e, de um modo geral, verifica-se que a adição de agregados finos de vidro conduz a argamassas e betões com melhor desempenho, sobretudo mecânico, comparativamente às argamassas e betões de referência, nomeadamente devido ao efeito de filler, isto é, devido ao facto de preencherem os espaços vazios existentes nas argamassas e betões convencionais.

5.1.2. Como matéria-prima para produção de cimento

De acordo com a composição química do vidro este poderá ser um material adequado como matéria-prima para a produção de cimento. A principal preocupação prende-se com o seu conteúdo de álcalis que poderá resultar na reação álcalis-agregado (RAA) ou, mais especificamente na reação álcalis-sílica (RAS) e na reação álcalis-carbonato (RAC). Estas reações podem levar à fissuração do betão.

No estudo de Chen *et al* (2002) foram caracterizados 32 tipos de vidro e a sua composição química comparada com a do cimento *Portland*. O conteúdo em álcalis varia entre 0 a 22% sendo que, para o vidro de garrada a taxa varia entre 10 e 19%. Conclui-se que a composição química do cimento usando vidro como matéria-prima será alterada no entanto, essa diferença será insignificante. As estações de monitorização utilizadas no estudo permitiram verificar que não há alterações significativas na alteração de poluentes. O conteúdo em álcalis do cimento aumenta ligeiramente mas ainda assim, dentro de valores aceitáveis.

Um outro estudo feito no mesmo ano pelos autores Xie e Xi permitiu concluir que a utilização de vidro na produção de cimento resulta num aumento da fase líquida entre os 950 e os 1250°C e o conteúdo de silicato tricálcico diminuiu. O vidro como matéria-prima tem os mesmos efeitos sobre o processo de queima do clínquer como outras matérias-primas de alto teor de álcalis. As propriedades do cimento feito a partir de vidro deverão ser as mesmas como os cimentos comuns.

5.1.3. Como substituição parcial de cimento em betão

Embora o cimento corresponda a apenas 10-15% do betão, em termos de massa (Coutinho, 2011), é um componente imprescindível como ligante na produção de betão. No entanto, é o constituinte do betão que causa maior carga ambiental. Torna-se então

extremamente vantajoso em termos de sustentabilidade do betão, tornar este componente mais sustentável.

Há já alguns anos que grandes quantidades de resíduos industriais tais como, escórias de alto-forno, cinzas volantes, sílica de fumo e cinzas de casca de arroz, têm sido utilizados pela indústria do cimento. No entanto, existem vários outros materiais que não foram usados ainda, nomeadamente os resíduos de vidro.

O facto de, devido à sua constituição química, o vidro poder ser considerado como uma pozolana artificial, confere a este material excelentes propriedades ligantes tornando-o assim, num forte candidato a ser adicionado no fabrico de betão, substituindo parcialmente a quantidade de cimento utilizada.

5.1.3.1. Efeito pozolânico do vidro

O vidro, tal como analisado no capítulo 3.1.6, é composto sobretudo por sílica amorfa e quantidades inferiores de óxidos de sódio e cálcio, apresentando assim uma composição favorável à ocorrência de reações pozolânicas. Estão então reunidas as condições para considerar o vidro como pozolana reativa, dado que possui uma superfície específica elevada, é um material amorfo e tem um elevado conteúdo em sílica.

Em 2000 Yixin Shao, em conjunto com outros autores, mediu o índice de pozolanicidade de três granulometrias de vidro diferentes: partículas entre 150 e 75 μm ; partículas entre 75 e 38 μm ; partículas inferiores a 38 μm . O objetivo do estudo foi examinar se o vidro moído grosseiro ainda apresentava certos níveis de comportamento pozolânico. Os resultados demonstraram que apenas o vidro de granulometria inferior a 38 μm teve um comportamento pozolânico satisfatório.

Shi et al. (2005) estudaram o índice pozolânico de quatro pós de vidro com granulometrias diferentes e concluíram que, quanto mais finas são as partículas de pó de vidro maior é a sua reatividade pozolânica. Também de acordo com estes mesmos autores, comparativamente com as cinzas volantes, o vidro tem mais SiO_2 , CaO e Na_2O , mas menor quantidade de alumínio e ferro (Al_2O_3 e Fe_2O_3).

Os autores Pereira e Santos (2007) afirmam que os resíduos de vidro possuem grande potencial de serem transformados em pozolanas, necessitando apenas da sua adequação física e o conhecimento do seu desempenho.

São vários os estudos que têm sido realizados no sentido de investigar o potencial pozolânico de resíduos de vidro finamente moídos. A generalidade desses estudos tem-se focado essencialmente na resistência do betão e na reação álcalis-sílica.

Matos e Coutinho (2012) realizaram argamassas com 10 e 20% de pó de vidro em substituição do teor de cimento e, em análise à resistência à compressão verificaram que as resistências nas argamassas com adição de vidro são inferiores às da argamassa de controlo aos 7 e 28 dias, diminuindo com a percentagem de substituição. No entanto, aos 90 dias os seus valores aproximam-se dos valores da argamassa de referência. A argamassa com 20% de substituição de vidro teve um ganho de resistências significativo entre os 28 e os 90 dias mostrando que a reação pozolânica toma lugar neste período.

Matos (2010), realizou um trabalho muito similar com as mesmas percentagens de substituição, e concluiu que o uso de pó de vidro como substituição parcial de cimento resulta numa perda de resistência, que diminui à medida que aumenta a idade dos provetes.

Também os autores Kruger *et al* (sem data) que analisaram a resistência à compressão de betões com substituição de 5 e 10% de cimento por resíduos de vidro, tendo igualmente obtido valores inferiores aos obtidos para os betões de referência, mas que aumentam com a idade do betão.

Shao *et al.* (2000) analisou a resistência à compressão em argamassas com 30% de substituição de cimento por diferentes granulometrias de vidro moído (150-75 μm , 75-38 μm e <38 μm), tendo verificado que todas as argamassas tiveram resistências mais baixas que a argamassa de controlo para as idades de 3, 7, 28 e 90 dias, exceto a argamassa com resíduos inferiores a 38 μm que aos 90 dias foi superior à argamassa de controlo. Os autores concluíram que quanto menores forem as partículas de vidro maior será a resistência à compressão das argamassas.

Um estudo equivalente foi realizado por Pereira e Santos (2007), que analisaram argamassas com substituição de 10, 20, 25,30 e 40% de cimento por diferentes granulometrias (0-45, 45-75 e 75-150 μm) de três tipos de vidro moído (âmbar, verde e incolor). Os resultados dos ensaios da resistência à compressão revelaram que esta diminui com o aumento da percentagem de substituição para todas as frações granulométricas. Observa-se ainda que, ao diminuir o tamanho das partículas, a resistência aumenta significativamente para as mesmas percentagens de substituição. No caso das partículas menores de 45 μm verifica-se que quer para o vidro âmbar, quer para o verde com substituição de 10% se obtém valores superiores aos de referência.

O autor Shayan (2002) estudou a substituição de cimento por resíduo de vidro em percentagens de 10, 20, 30 e 40% e também obteve para estas adições valores inferiores de resistência à compressão do que para o betão de referência.

5.2. Reação álcalis - agregado

A reação álcalis-agregado (RAA) é uma reação química que ocorre entre os íões de sódio e potássio (álcalis) e os íões hidroxilos do cimento e alguns minerais reativos existentes nos agregados, na presença de humidade. Apenas na presença destes três reagentes em determinadas proporções se desenvolve a reação. Processa-se no interior do betão quando este se encontra num estado endurecido e, resulta no aparecimento de um gel na zona de interface pasta-agregado e vazios do betão, capaz de se expandir na presença de humidade. Essa expansão leva ao surgimento de fissuras e, por vezes, a deslocamentos diferenciais da estrutura, o que pode comprometer a resistência e, conseqüentemente, a durabilidade do betão. Outra manifestação que pode surgir deste tipo de reação é a exsudação do gel na superfície do betão.

Esta reação foi estudada pela primeira vez por Stanton em 1940 nos Estados Unidos, e que a identificou como sendo “uma reação deletéria que ocorria entre os constituintes do betão, a sílica do agregado e os álcalis do cimento” e que lhe deu o nome pela qual ainda hoje é conhecida (reação álcalis-agregado).

A possibilidade de ocorrência da RAA está fortemente ligada à quantidade de álcalis disponíveis, a reatividade dos agregados e a presença de humidade na estrutura de betão. Uma vez desencadeada a reação, ainda não é possível prever quanto tempo será necessário para que ela termine. No entanto, de acordo com Biczok (1972) e citado por Nogueira (2010), o tempo necessário para notar indícios da RAA ou danos numa estrutura depende de vários fatores, destacando-se o tipo e tamanho dos agregados, o teor de álcalis do cimento, a composição do gel, a temperatura, a humidade, entre outros fatores.

5.2.1. Tipos de reação álcalis-agregado

De acordo com a literatura, a RAA pode ser classificada de três formas diferentes, em função da composição mineralógica dos agregados constituintes do betão: a **reação álcalis-sílica (RAS)**, **reação álcalis-silicato (RASS)** e a **reação álcalis-carbonato (RAC)**.

A **reação álcalis-sílica** é a mais comum e mais rápida das três e na qual participam os álcalis presentes nos poros do betão e a sílica reativa dos agregados, na presença do hidróxido de cálcio advindo da hidratação do cimento. Isto acontece porque, algumas formas de sílica (com malha cristalina defeituosa) presentes em alguns agregados, são instáveis em soluções de pH elevado e reagem com os hidróxidos alcalinos.

É geralmente aceite que a reação química entre os hidróxidos alcalinos e a sílica reativa é, essencialmente, uma reação de dissolução. Isto ocorre como resultado do aumento da solubilidade de formas de sílica amorfa, desordenada ou pouco cristalizada, em soluções de pH elevado. A reação origina um gel de álcalis-sílica higroscópico que absorve água e expande. As forças geradas por essa expansão podem ser suficientes para quebrar os agregados e o betão circundante, causando fissuração e consequentemente, deterioração (Wigum,1995).

A sílica reativa pode apresentar-se sob várias formas. Em ordem decrescente de reatividade, tem-se a forma amorfa (opala), criptocristalina (chert, flint e calcedónia) e a forma metaestável (tridimita e cristobalita). Os vidros naturais ou vulcânicos também são minerais altamente reativos devido à presença de quartzo de rocha. De referir que, a sílica pouco cristalina permite a penetração dos iões hidroxilos e alcalinos dando origem à RAS, enquanto que na sílica bem cristalizada os iões atacam somente a superfície externa e a RAS não se desencadeia.

A superfície da sílica não hidratada possui um ião oxigénio ligado somente a um ião de silício (**Figura 12.a**). Quando a sílica é hidratada, as moléculas de H₂O da água cedem um ião hidrogénio livre (H⁺) que se liga ao ião oxigénio da superfície da sílica enquanto que o ião OH⁻ se combina com o ião de silício, formando-se assim uma superfície com grupos OH. (**Figura 12.b**).

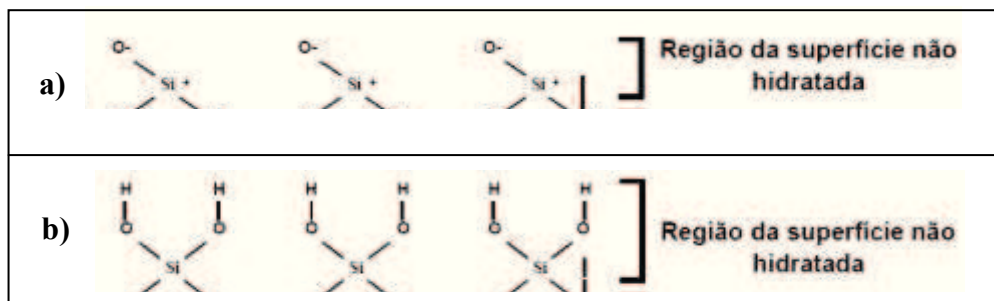


Figura 12: Esquemática da superfície da sílica: a) não hidratada; b) hidratada
(Adaptado de Santos e Brito, 2008)

A **Figura 13** esquematiza as diferentes etapas da reação álcalis-sílica.

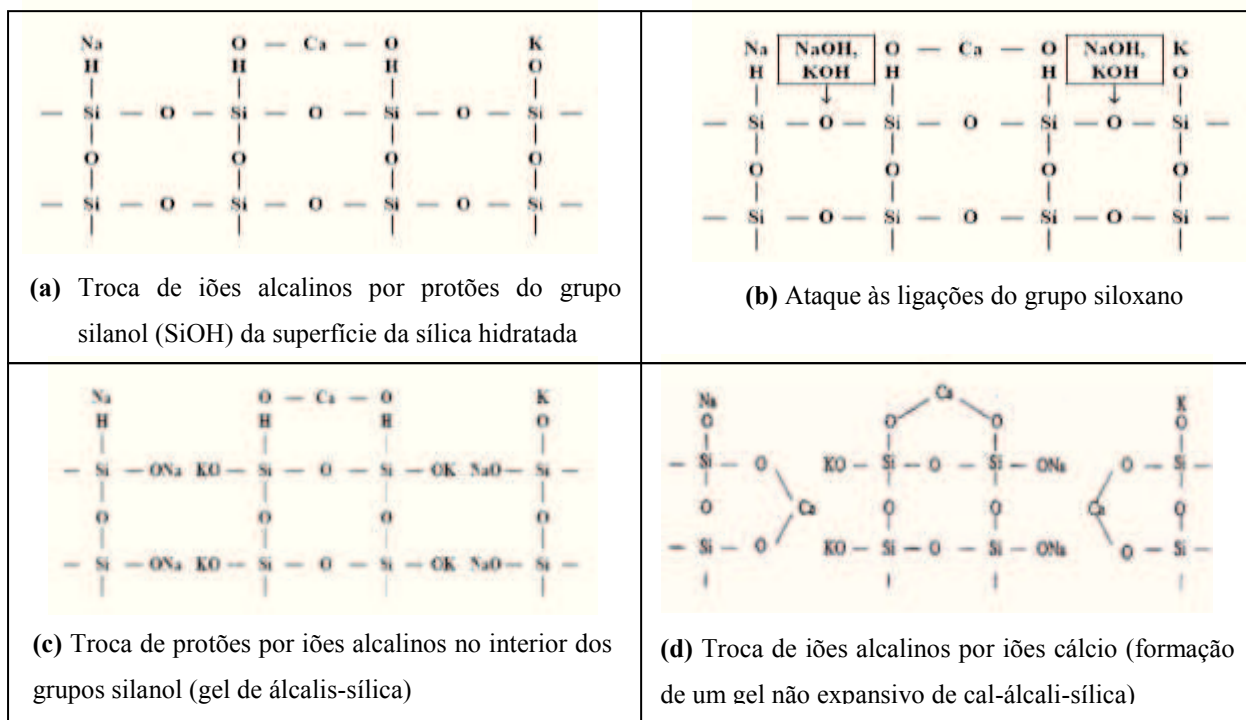


Figura 13: Sequência da reação álcalis-agregado

(Adaptado de Lucca (2010)).

Wang e Gillott (1991) referidos por Lucca (2010), afirmam que o Ca(OH)_2 é prejudicial por manter o pH da solução presente nos poros elevado, e por libertar íons cálcio que podem ser trocados por Na^+ e K^+ , permitindo que estes possam produzir mais produtos expansivos.

De acordo com Forum (1965) citado por Lucca (2010) o gel pode ou não ser expansivo conforme a concentração de íons cálcio ou de álcalis. Se a concentração de cálcio for superior à de álcalis, haverá a formação de um gel não expansivo de cal-álcali-sílica, mas se a concentração de álcalis for maior, formar-se-á um gel expansivo de álcalis-sílica. Ao encontro disto, Mizumoto (2009) afirma que o carácter expansivo do gel é regido pela quantidade de CaO disponível.

Existe um “conteúdo ou efeito péssimo” para cada agregado ou mistura de agregados reativos para o qual ocorre uma expansão máxima. Assim, até uma determinada percentagem de agregado reativo, a expansão aumenta com o aumento de quantidade de agregado, até que chega a um ponto a partir do qual, embora aumentando a quantidade de agregado reativo, a expansão diminui. O pico de expansão é então o conteúdo ou efeito péssimo.

Quando a proporção de sílica reativa é superior ao “conteúdo péssimo”, a concentração de íons hidroxilos não é suficiente para manter a reação e a expansão decresce (Fernandes, 2005). Desde modo, o “efeito péssimo” significa também que se pode considerar

a utilização de agregados com sílica fortemente reativa no betão sem que por isso ocorram alterações devido à reação com os álcalis (Le Roux, 2001 citado por Fernandes, 2005).

A **reação álcalis-silicato** possui o mesmo princípio da RAS mas é muito menos frequente e processa-se de forma mais lenta, uma vez que os minerais reativos estão mais disseminados na matriz. A interação química da RASS ocorre entre os álcalis dos poros do betão e alguns minerais do grupo dos silicatos, sendo que esses minerais têm normalmente retículo cristalino deformado e podem sofrer esfoliações e expandir em contato com a água.

Os silicatos reativos mais comuns são o quartzo advindo dos processos tectónicos e os minerais expansivos da classe dos filossilicatos⁵, tais como vermiculitas, ilitas e montmorilonitas expansivas. Podem aparecer em rochas sedimentares (argilitos, silitos e grauvacas), metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos e hornfels) e ígneas (granitos). A reatividade destes minerais depende essencialmente da textura e tamanho dos grãos.

A RAS e a RASS podem ocorrer simultaneamente, prejudicando o diagnóstico da reação. Neste caso, e de acordo com Hobbs (1988) citado por Hasparyk (2005), o mesmo produto da reação álcali-sílica pode ser encontrado no betão atacado pela reação álcali-silicato, devido à presença de filossilicatos presentes nos agregados.

Gillott (1986) salienta que em todos os casos de RASS, a entrada e saída de água é essencial para o mecanismo de expansão, sendo que a estrutura da rocha tem uma influência considerável no mecanismo, na proporção e no grau de expansão, pois muitas vezes os minerais são componentes expansivos (Tiecher, 2006).

A **reação álcalis-carbonato** dá-se entre alguns calcários dolomíticos, dolomitos calcíticos e os álcalis do cimento, manifestando-se através de expansões no betão. No entanto, contrariamente às outras reações de álcalis-agregado, na RAC não ocorre a formação do gel expansivo, sendo o mecanismo de expansão decorrente da combinação de dois fenómenos: a desdolomitização, que desestrutura a textura do calcário, e a ocorrência de argilominerais (ilita) que beneficiam a desagregação do agregado (Kihara (1986) citado por Mizumoto (2009).

⁵ Filossilicatos ou silicatos em folha, são minerais presentes em grande parte das rochas, qualquer que seja o seu tipo.

Esta reação difere da RAS não só pela não formação de gel expansivo, mas também pelo facto de haver regeneração dos álcalis.

5.2.2. Fatores que influenciam a RAA

5.2.2.1. Os álcalis

Os álcalis são, do ponto de vista químico, os elementos que se localizam na primeira coluna da tabela periódica (Grupo I), à exceção do hidrogénio. Do ponto de vista da química do cimento, apenas o sódio e o potássio ganham destaque, sendo que são frequentemente expressados na forma de óxido de potássio (K_2O) e de óxido de sódio (Na_2O).

De acordo com Santos e Brito (2008), os álcalis do cimento são provenientes da matéria-prima utilizada no fabrico do cimento *Portland*, principalmente do calcário, marga, argila, xisto argiloso ou do carvão utilizado por vezes como combustível, e encontram-se fundamentalmente sob a forma de sulfatos, silicatos e aluminatos.

Os álcalis do cimento têm então a sua origem no processo de calcinação do clínquer. Os iões K^+ e Na^+ são vaporizados devido às altas temperaturas dos fornos. À medida que o clínquer é transportado através do forno, dá-se a condensação dos mesmos, criando uma camada superficial de álcalis. Alguns álcalis permanecem na superfície do clínquer, enquanto que outros se encontram dentro da sua estrutura (Peterson *et al.*, 2000 citado por Lopes, 2004). Quando acontece a hidratação do betão, os álcalis de superfície encontram-se rapidamente mais disponíveis, enquanto que os outros se mostram disponíveis ao longo do processo (Santos e Brito, 2008).

Os álcalis do cimento podem ser classificados como solúveis ou insolúveis, sendo que os primeiros estão presentes nos sulfatos ao passo que os segundos encontram-se na forma sólida do clínquer. De acordo com Glasser (1992) e citado por Hasparyk (2005), durante a hidratação do cimento, o fornecimento dos álcalis para a solução ocorre de forma mais rápida a partir daqueles presentes nos sulfatos, sendo que os demais, incorporados nos grãos do clínquer, só ficam disponíveis à medida que se processa a hidratação, de forma mais lenta. De qualquer forma, independentemente da fonte dos álcalis, uma vez que a RAA ocorre lentamente, todos os álcalis existentes poderão participar na reação.

Este tipo de componentes alcalinos em solução levam ao aumento da alcalinidade nos poros do betão (pH) elevando a concentração de hidroxilos (OH^-) responsáveis pela reação

RAA (Mizumoto, 2009). De acordo com Hobbs (1988) citado por Santos e Brito (2008), o pH de betões feitos com cimentos de baixo teor alcalino está entre os 12,7 e os 13,1, enquanto que cimentos com teor de álcalis elevado podem levar a betões de 13,5 a 13,9. Este alto pH facilita e acelera a dissolução de certos minerais, o que acaba por contribuir para a reação álcalis-agregado.

O teor de álcalis no cimento é calculado a partir da percentagem de óxido do sódio equivalente, através da equação 1:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} (\%) = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} \quad \text{Equação 1}$$

Segundo Hobbs (1988), a quantidade total de álcalis solúveis presentes no cimento varia entre 0,3 e 1,3%. Os autores Rigden, Mijlesi e Burley (1995) avaliaram a influência do aumento de quantidade de álcalis no cimento, tendo verificado que o decréscimo de 12 para 5,8 Kg $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ resultou num decréscimo de 40% nas expansões. Concluíram ainda que o hidróxido de potássio resulta em expansões mais moderadas que o hidróxido de sódio, especialmente quando são usados elevados níveis de álcalis no betão.

Com a intenção de se evitar a reação entre os álcalis do cimento e os agregados reativos, a ASTM C 150/97 limitou o equivalente alcalino nos cimentos em 0,6%. No entanto, Stievenard-Gireaud (1987) referido por Fernandes (2005), considera que pode ocorrer reação mesmo para teores mais baixos de álcalis e recomenda que, sempre que sejam utilizados agregados reativos, o cimento contenha entre 0,30 e 0,40% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ a fim de diminuir o risco de reação.

De acordo com Furnas (1997) citado por Nogueira (2010), é necessário estabelecer valores limites não somente de percentagem de álcalis no cimento, mas também de cimento no betão.

A quantidade de álcalis poderá, no entanto, não ser um critério determinante para o desenvolvimento de reações álcali-sílica, mas o fator principal parece residir na solubilização do agregado sob o ataque dos iões OH^- (Prince e Perami, 1993 citado por Fernandes, 2005).

Deve no entanto, ter-se em conta as contribuições externas de álcalis nos betões, pelo que a utilização de cimentos com baixos teores em álcalis não é condição suficiente para que a reação não ocorra. Assim, é necessário contabilizar a possível contribuição de álcalis dos componentes do betão e limitar o valor máximo em álcalis no betão.

5.2.2.2. Fontes externas de álcalis

Os álcalis que se encontram no betão têm maioritariamente origem no cimento, no entanto podem também provir de outras fontes externas. Certos tipos de agregados podem também libertar álcalis, sendo que este tipo de comportamento é atribuído aos feldspatos, zeólitos e rochas ígneas, nomeadamente andesitos, riólitos e granitos. Gillott e Rogers (1994) citados por Tiecher (2006), realizaram análises químicas a feldspatos que mostraram que com o passar do tempo a concentração de Na_2O na solução dos poros do betão aumentou. Constantiner e Diamond (2003) verificaram que os feldspatos libertam quantidades significativas de álcalis na solução dos poros do betão, sendo que esses álcalis podem desencadear a RAA mesmo que o cimento utilizado tenha um baixo teor de álcalis.

A água do mar também pode ser uma fonte de álcalis no betão, quer esta seja utilizada na amassadura quer entre em contacto com o betão quando este se encontra já no estado endurecido. Este fenómeno deve-se à presença de cloreto de sódio (NaCl) e é especialmente preocupante em zonas de marés onde se dão ciclos de molhagem e secagem. Também a água do subsolo, rica em sulfatos, podem levar ao aumento do teor de álcalis no betão.

O cloreto de sódio é também usado frequentemente como sal descongelante em países com invernos severos, o que também constitui uma fonte de álcalis no betão. O sal seco é transportado pelo vento para a superfície do betão e durante a noite, com a condensação da água, esse sal é absorvido pelo betão. Kawamura, Takeuchi e Sugiyama (1996) citados por Tiecher (2006), estudaram a influência do NaCl na reação álcalis-agregado e verificaram que, as argamassas expostas ao NaCl tiveram expansões muito superiores pois este acelerou a difusão dos iões OH^- .

Para além do cloreto de sódio, também adições químicas de sulfatos e nitratos, nomeadamente soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4), introduzidas através da água de amassadura, aumentam a concentração de álcalis no betão.

5.2.2.3. Agregados

Os agregados reativos possuem diversas características, relacionadas que afetam a magnitude da reação álcalis-agregado. As evidências de reatividade de um mineral estão vinculadas à sua granulometria, textura, cristalinidade, estrutura, fase mineralógica e alterações geológicas sofridas.

Uma das características com maior destaque é o tamanho das partículas pois, se estas forem pequenas aumentam as expansões, mas se forem muito pequenas (na ordem dos micro) pode ocorrer o oposto. Isto acontece pois a grande quantidade de superfície específica dos materiais finos faz com que a concentração de álcalis seja rapidamente reduzida, impedindo que a reação ocorra nos agregados maiores, a qual provocaria a formação do gel expansivo.

Vivian (1951) citado por Nogueira (2010) constatou que a presença de agregados reativos muito pequena ($<0,050$ mm) provocam uma reação antes do gel se formar. Nogueira (2010) refere-se também ao estudo de Andriolo (2006), que constatou a mitigação das expansões com o aumento do teor de finos inferiores a $0,075$ mm. Por outro lado, Zhang *et al.* (1999) concluíram que os agregados que causam maiores expansões têm tamanhos entre $0,15$ e 10 mm (Tiecher, 2006).

5.2.2.4. Humidade

A presença de humidade é essencial para a ocorrência da RAA, sendo que sem ela a reação não ocorre, mesmo na presença de álcalis e de agregados reativos. Kuperman (2005) relata que é necessário um mínimo de 80% de humidade relativa para a expansão causada pela reação seja significativa.

No desenvolvimento da RAA, a água transporta os catiões alcalinos e os iões OH^- , sendo absorvida pelo gel sílico-alcalino. O aumento da humidade pode conduzir a expansões muito elevadas, dependendo da quantidade de gel formada.

A água é um agente com grande importância na deterioração do betão pelo facto de ser um excelente solvente, capaz de dissolver muitos elementos químicos, e por ter grande facilidade em penetrar os poros do betão, levando esses elementos químicos a todo o betão.

Larive (1997) afirma que se por um lado a água influencia a velocidade de expansão no momento da formação dos produtos da reação, sendo considerada um agente reativo, por outro lado assegura o transporte das diferentes espécies reativas, sendo considerada como um meio reacional, caracterizando-se, assim, o efeito duplo da água na RAA (Silva, 2009).

A exposição do betão reativo à humidade elevada só provoca expansão enquanto a reação ainda estiver em andamento. Portanto, a influência da água sobre a amplitude das deformações é limitada pelo processo de formação dos produtos de reação (Lopes, 2004).

A taxa de absorção de água depende do tipo de agregado presente no betão e da natureza do gel formado. Wang (1990) referido por Tiecher (2006), afirma que, em geral o gel

que contém baixos teores de cálcio tem um grande aumento de absorção de água com o aumento da humidade.

5.2.2.5. Temperatura

A temperatura afeta a RAA essencialmente em termos de velocidade podendo-se afirmar que funciona como um catalisador da reação, acelerando-a. Por outro lado, com temperaturas mais elevadas o gel torna-se mais viscoso tendo assim mais facilidade em percolar pelos poros do betão.

Swamy e Al-Alasi (1988) verificaram que os betões curados a 38°C apresentaram considerável redução da resistência à compressão com o passar de um ano, além de apresentarem expansão e fissuração bastante severas. As amostras curadas a 20°C mostraram poucas evidências de deterioração e aumento contínuo da resistência à compressão.

5.2.3. Processos para mitigar a RAA

5.2.3.1. Adições minerais

O uso de adições aos betões tem vindo a ser estudado e colocado em prática como forma de reduzir a RAA, principalmente as adições pozolânicas. O mecanismo baseia-se na reação entre as pozolanas e o hidróxido de cálcio da pasta do cimento, diminuindo o pH da solução dos poros e, consecutivamente a reação álcalis-agregado. De acordo com Diamond (1984) e citado por Tiecher (2006), no mecanismo de combate à RAA com o uso de adições minerais, a sílica contida nas adições minerais reage com os álcalis do cimento antes da sílica presente nos agregados, sendo que esta reação não é prejudicial, pois os produtos não aumentam de volume.

Hasparyk (1999) investigou a eficiência de adições minerais, como a sílica ativa e a cinza de casca de arroz na minimização da expansão, e constatou que o teor ótimo de adição ao cimento é de 15% para os agregados dos tipos basalto e quartzito analisados, embora 12% de ambas as adições sejam suficientes para reduzir a expansão (Nogueira, 2010).

Outros minerais como as escórias de alto-forno, cinzas volantes e o metacaulim têm sido objeto de estudo para a minimização da RAA. Ao analisar os resultados obtidos na literatura verifica-se que quase todas as adições são eficientes para inibir as expansões decorrentes da RAA. No entanto, é necessário ter em conta os teores e frações

granulométricas mais indicadas para que a reação seja inibida e não desencadeada. Especial cuidado deve ser tido com a cinza de casca de arroz e com a sílica ativa, pois estas possuem grandes percentagens de sílica amorfa.

5.2.3.2. Adições químicas

Dentre os compostos químicos estudados pelos pesquisadores, o sulfato de alumínio e o sulfato de zinco são os que têm demonstrado melhores resultados. Prezzi *et al.* (1997) realizaram estudos de diversos compostos químicos e concluíram que os compostos à base de lítio (hidróxidos e carbonatos) se mostraram capazes de reduzir as expansões a níveis abaixo dos limites prescritos por norma.

Considera-se que o lítio substitui parte do sódio e do potássio presente no gel resultante da reação. O Li^+ é capaz de inibir a reação porque tem menor raio atômico e maior densidade de superfície carregada que o Na^+ e o K^+ , o que o capacita de entrar nos produtos da reação mais rapidamente, fazendo com que seja produzido gel cristalino e não-expansivo (MO *et al.*,2003).

De todos os sais de lítio, o LiNO_3 é o mais eficiente pelo facto de não aumentar a concentração de iões OH^- na solução dos poros, ser neutro e altamente solúvel.

Estudos têm revelado que a dissolução da sílica diminui à medida que o lítio aumenta. No entanto ainda muito se desconhece à cerca deste tipo de adições pelo que o seu uso não é ainda muito comum.

5.3. Trabalho experimental

5.3.1. Caracterização dos constituintes

5.3.1.1. Cimento

O cimento usado neste projeto foi do tipo CEM I 42,5 R cedido pela SECIL (fábrica da Maceira-Liz). Este cimento é um produto de elevada qualidade e performance muito usado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É ainda o cimento com menor percentagem de adições correspondendo a sua composição a pelo menos 95% de clínquer de cimento Portland. Uma vez que, neste trabalho se testaram betões com adição de resíduo, interessa usar um cimento com poucas adições para eliminar possíveis interferências dessas adições e más interpretações de resultados. Assim, o cimento do tipo CEM I 42,5 R foi o mais indicado para este tipo de estudo

Nas **Tabelas 1 e 2** estão resumidas, respetivamente, as características químicas e mecânicas do cimento utilizado de acordo com a ficha técnica cedida pela SECIL. A ficha técnica pode ser encontrada na sua íntegra no **Anexo IV**.

Tabela 1: Características químicas do cimento utilizado (CEM I 42,5 R).

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado *
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos /em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

* As percentagens são referidas à massa de cimento

Tabela 2: Características mecânicas do cimento utilizado (CEM I 42,5 R).

Resistência à Compressão (MPa)			
Resistência nos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

5.3.1.2. Resíduo de vidro

O resíduo de vidro utilizado neste trabalho é proveniente da trituração do resíduo advindo das máquinas de escolha ótica presentes na Vidrociclo. A caracterização deste resíduo foi já apresentada no capítulo 4.3.1.

Nesta campanha experimental, foi efetuada em laboratório uma análise granulométrica ao resíduo de vidro usado e já triturado, de acordo com a norma NP 1379. Na **Tabela 3** e no **Gráfico 2** apresentam-se os resultados dessa caracterização.

Tabela 3: Análise granulométrica do resíduo de vidro utilizado.

Granulometria (em mm)	12,5 a	9,5 a	6,3 a	4,75 a	2,36 a	1,18 a	0,6 a	0,3 a	0,15 a	< 0,075
Quantidade de material (em %)	0,61	12,65	39,16	42,8	2,42	0,75	0,82	0,58	0,19	0,03
Quantidade de material (em gramas)	5,34	110,07	340,85	372,53	21,04	6,5	7,12	5,01	1,66	0,3

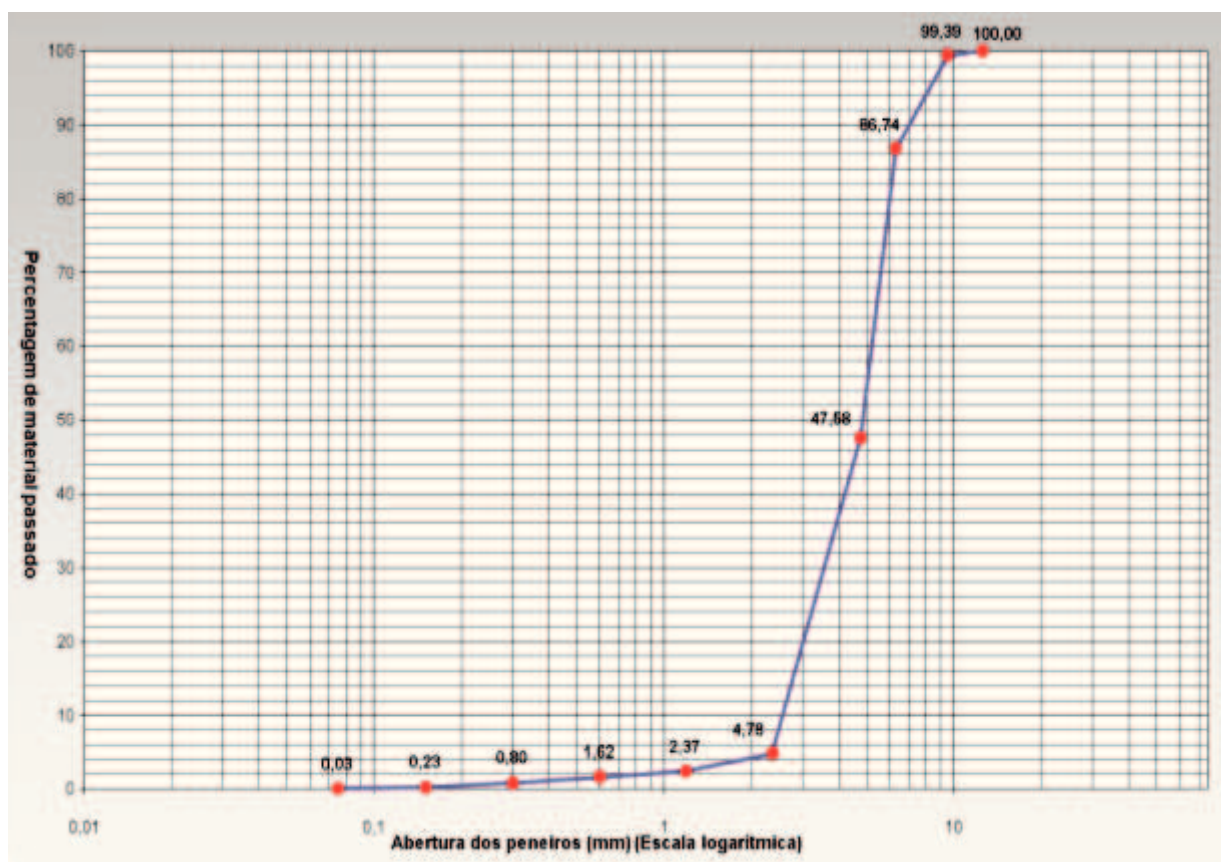


Gráfico 2: Curva granulométrica do resíduo de vidro utilizado.

5.3.1.3. Agregados

Neste trabalho experimental foi utilizada areia fina e dois tipos de brita, uma mais grossa que a outra. Foram efetuadas análises granulométricas a estes agregados de acordo com a norma NP 1379, cujos resultados são apresentados nas **Tabelas 4 a 6** e nas curvas correspondentes nos **Gráficos 3 a 5**.

Tabela 4: Análise granulométrica da areia utilizada.

Granulometria (em mm)	9,5 a	6,3 a	4,75 a	2,36 a	1,18 a	0,6 a	0,3 a	0,15 a	< 0,075
Quantidade de material (em %)	0,76	1,56	12,58	17,24	21,49	37,75	7,49	0,93	0,2
Quantidade de material (em gramas)	7,63	15,67	126,62	173,58	216,39	380,03	75,45	9,35	2,03

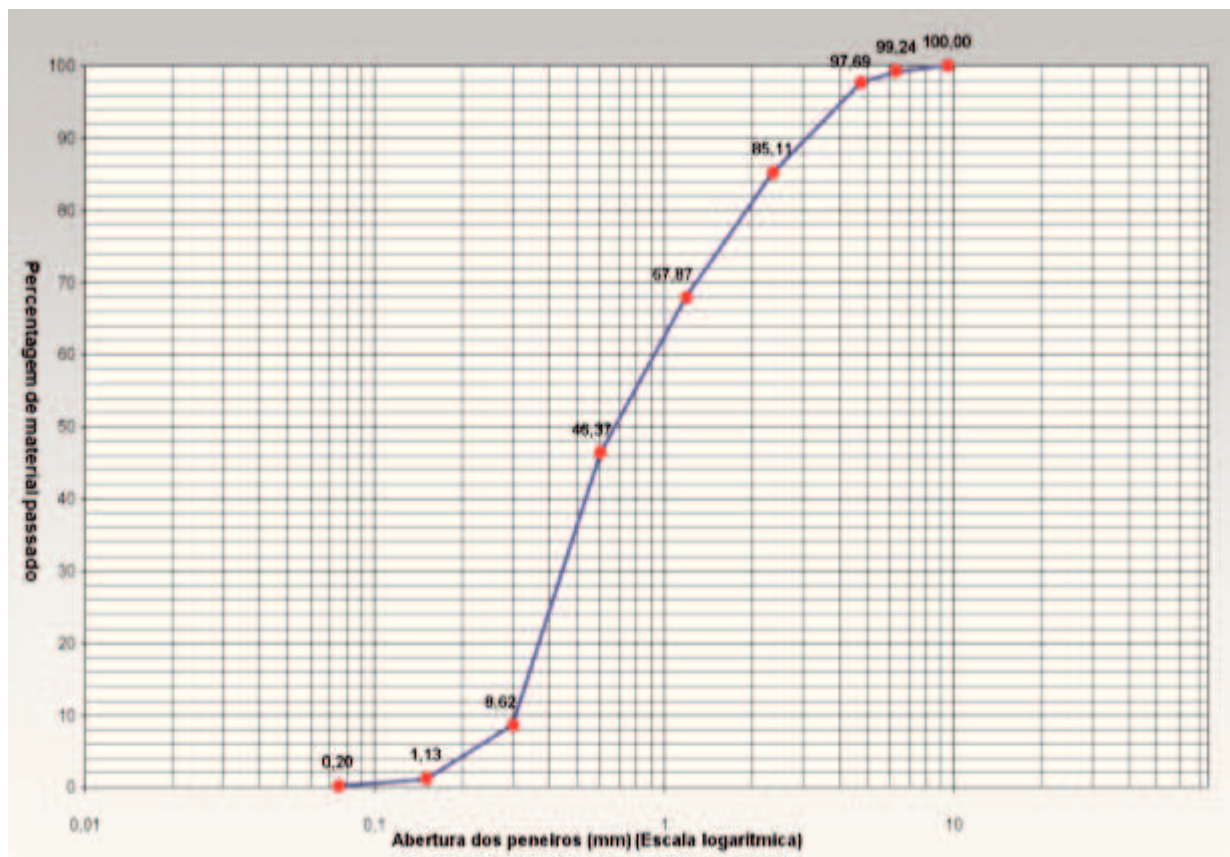


Gráfico 3: Curva granulométrica da areia fina utilizada.

Tabela 5: Curva granulométrica da brita fina utilizada.

Classe Granulométrica (em mm)	19,0 a	12,5 a	9,5 a	6,3 a	4,75 a	2,36 a	1,18 a	0,6 a	0,3 a	0,15 a	< 0,075
Quantidade de material (em %)	0,69	26,51	63,62	4,25	1,81	0,63	0,34	0,34	0,26	0,56	0,97
Quantidade de material (em gramas)	12,42	475,88	1141,96	76,25	32,57	11,36	6,15	6,09	4,68	10,1	17,37

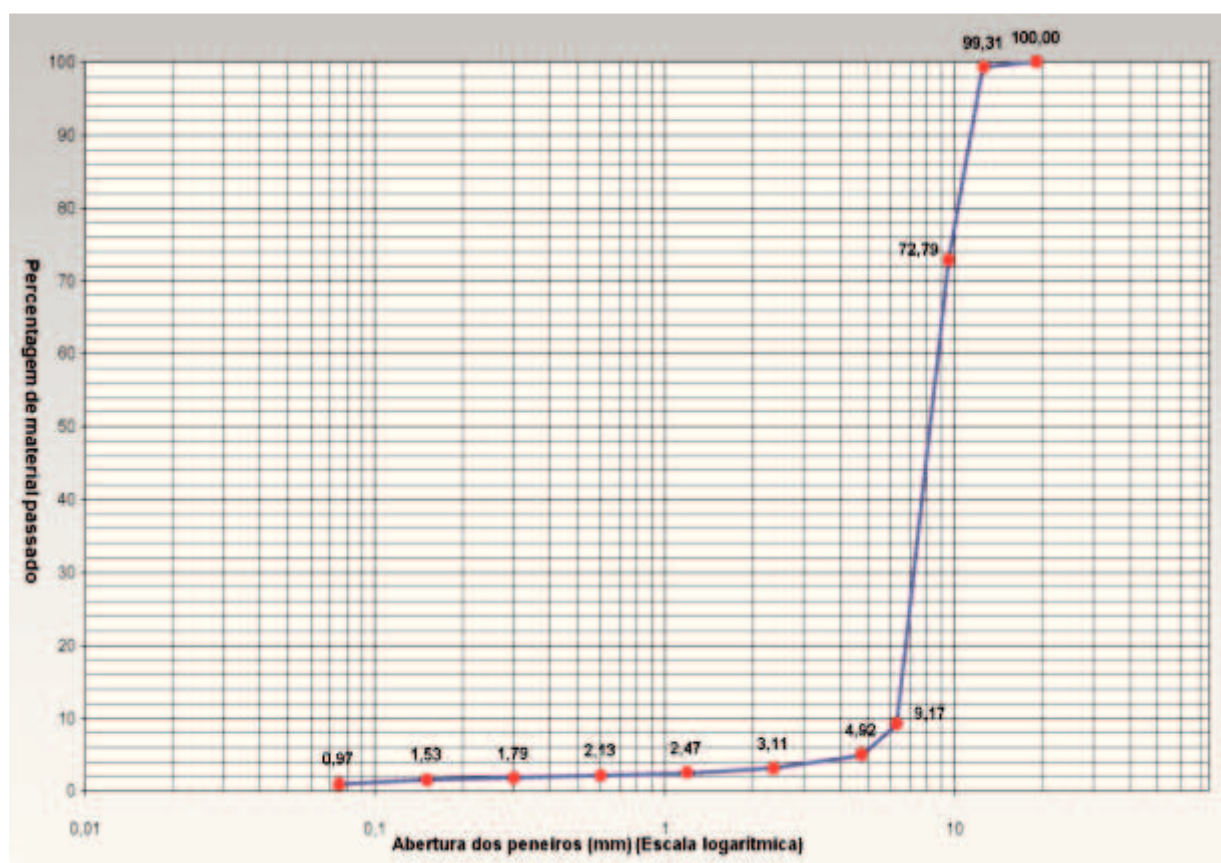


Gráfico 4: Curva granulométrica da brita fina utilizada.

Tabela 6: Curva granulométrica da brita grossa utilizada.

Granulometria (em mm)	25,0 a	19,0 a	12,5 a	9,5 a	6,3 a	4,75 a	2,36 a	1,18 a	0,6 a	0,3 a	0,15 a	< 0,075
Quantidade de material (em %)	3,26	69,75	23,65	2,89	0,03	0,01	0	0,01	0,05	0,08	0,15	0,11
Quantidade de material (em gramas)	97,81	2094,94	710,33	86,67	1	0,36	0,06	0,45	1,46	2,51	4,44	3,37

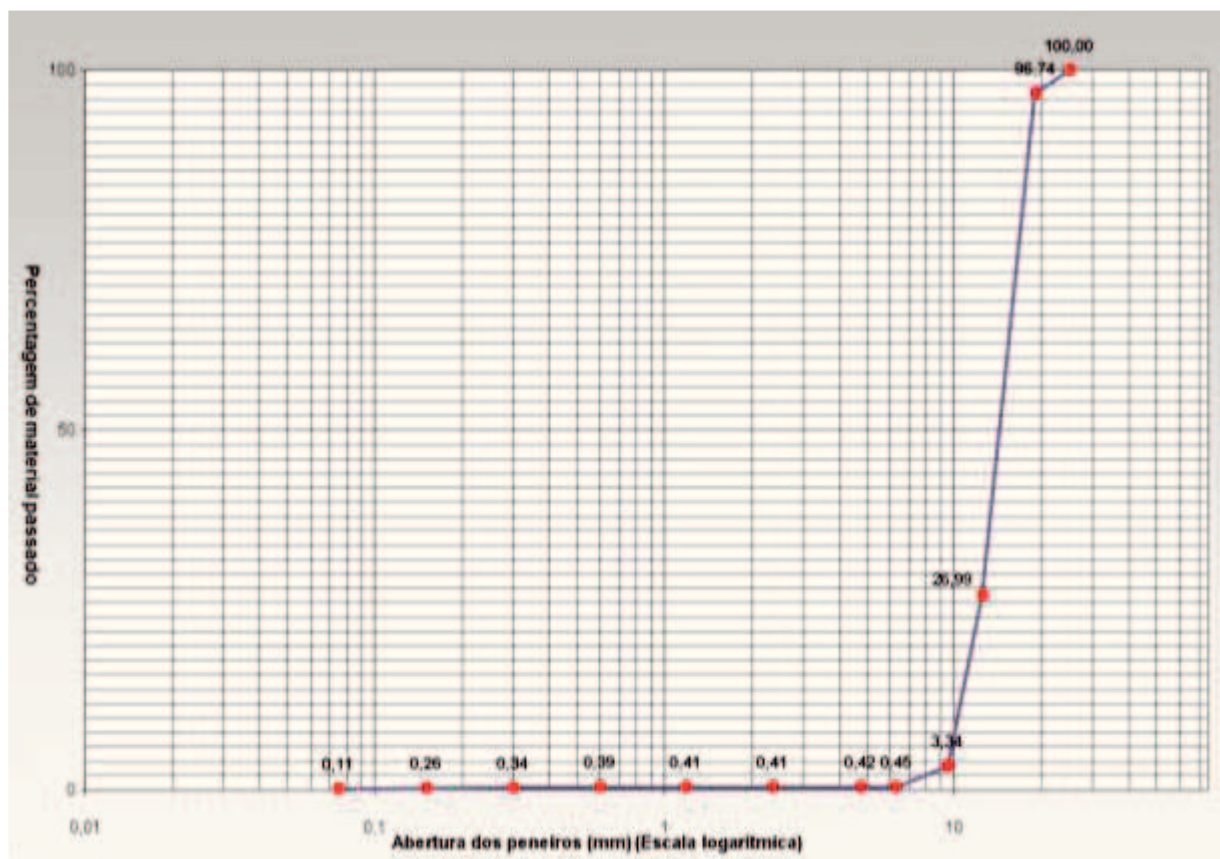


Gráfico 5: Curva granulométrica da brita grossa utilizada.

Estas análises granulométricas foram efetuadas com o intuito de determinar a quantidade de resíduo e de agregados a misturar na preparação dos provetes, por forma a diminuir ao máximo os espaços vazios entre eles.

Os registos fotográficos da execução dessas mesmas análises estão presentes no **Anexo III**.

5.3.1.4. Adjuvante

O adjuvante utilizado foi o superplastificante Viscocrete HE cedido pela empresa SIKA. Foi usado no sentido de aumentar a trabalhabilidade e diminuir a quantidade de água utilizada nas misturas. A ficha técnica deste material pode ser consultada no **Anexo IV**.

5.3.2. Misturas ensaiadas

O objetivo desta campanha experimental foi analisar as potenciais propriedades aglutinantes do resíduo de vidro. Como tal, foram preparados betões com substituição de

parte do teor de cimento por diferentes percentagens de resíduo de vidro. Foram analisadas quatro composições de betão: uma de referência, isto é, sem adição de resíduo, e três com diferentes percentagens de adição de resíduo de vidro, 5%, 10% e 15%. A tabela seguinte resume as quantidades dos materiais utilizados nas diferentes misturas ensaiadas.

Tabela 7: Composição dos provetes de betão.

% de adição Componentes	0% de adição (betão de referência)	5% de adição	10% de adição	15% de adição
Brita Grossa (Kg)	24,5	24,48	24,46	24,43
Brita Fina (Kg)	12,96	13,24	13,53	13,81
Areia (Kg)	23,67	22,51	21,36	20,2
Água (L)	5,087	5,087	5,087	5,087
Adjuvante (Kg)	0,176	0,176	0,176	0,176
Cimento (Kg)	17,5	16,63	15,75	14,88
Resíduo de vidro (Kg)	-	0,88	1,75	2,63

Na figura a seguinte esquematizam-se a composição das diferentes misturas ensaiadas.

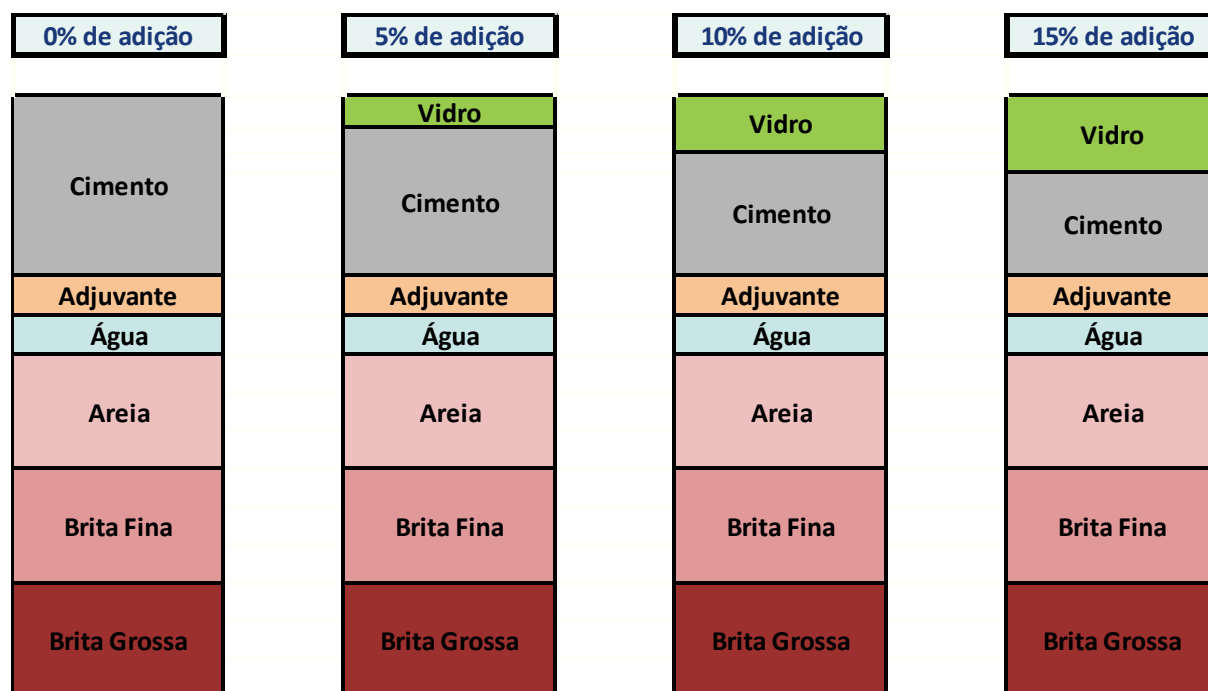


Figura 14: Esquematização da composição das diferentes misturas ensaiadas.

A preparação dos provetes foi feita segunda a norma NP EN 12390-1:2009. Para cada percentagem de adição de resíduo, foram betonados três cubos de 15 cm de aresta por idade.

Assim, para cada formulação prepararam-se 9 provetes de betão, ou seja, um total de 36 cubos de betão.

Os provetes foram conservados nos moldes durante 48h e depois desmoldados e colocados dentro de água numa cuba própria para o efeito, onde foram conservados até ao momento dos ensaios, assegurando as condições de cura preconizadas pela norma NP EN 12390-2:2009 para avaliação da resistência à compressão (20°C e 100% de humidade relativa).

As imagens referentes à produção, desmoldagem e cura dos provetes encontram-se presentes no **Anexo III** e as folhas de cálculo usadas para a determinação das composições de betão podem ser consultadas no **Anexo IV**.

5.3.3. Ensaios realizados

5.3.3.1. Resistência à compressão

A resistência mecânica do betão é a propriedade mais importante em termos de utilização estrutural pelo que todas as normas fixam valores mínimos desta propriedade (*Neville* (1995) citado por Matos (2010)).

Nesta campanha experimental foram feitos ensaios da resistência à compressão para as idades de 7, 28 e 84 dias, de acordo com a norma EN 12390-3:2003. Na data dos ensaios os provetes foram retirados da água de cura e submetidos ao ensaio de resistência à compressão. O resultado da resistência à compressão para cada formulação foi obtido por média aritmética dos três resultados individuais.

5.3.3.2. Ensaios de lixiviação

Por forma a analisar a viabilidade ambiental dos betões com a incorporação de resíduos de vidro, foram analisadas quatro amostras de água de cura onde os betões estiveram submersos. As quatro amostras de água analisadas correspondem às idades dos ensaios à compressão, isto é, uma amostra inicial (**Amostra 1**) da água antes dos provetes serem colocados na água de cura (água de referência), uma segunda amostra (**Amostra 2**) recolhida após 7 dias de submersão dos betões, uma terceira amostra (**Amostra 3**) recolhida após 28 dias de submersão do betão e uma quarta amostra (**Amostra 4**) recolhida após 84 dias de cura dos betões.

Após a recolha de cada uma das amostras, colocou-se cerca de 1 L de amostra num recipiente fechado, adicionou-se 2 a 3 gotas de ácido nítrico (HNO_3) e conservou-se a amostra no frigorífico. Depois da recolha de todas as amostras, estas foram sujeitas a uma filtragem e posterior análise de metais por espectrofotometria, usando um espectrofotómetro de absorção atómica por chama. Os metais analisados foram o cobre e o zinco, e foram analisados de acordo com o *Standard Methods*. Os cálculos de concentração de metais foram feitos através do método da curva de calibração.

Este estudo de lixiviação dos metais pretende perceber se há problemas de contaminação, associados ao uso de resíduos de vidro em betão. No entanto, uma série de limitações condicionaram os resultados destas análises. O ideal teria sido colocar os betões com diferentes adições em diferentes cubas de cura, para assim poder comparar os resultados com o aumento de tempo de endurecimento do betão, mas também com o aumento da adição de resíduo. No entanto pelo fato de no Laboratório de Estruturas e Betão Armado apenas existir uma cuba de cura, essa separação de águas não foi efetuada.

Ainda pela existência de uma única cuba no laboratório, para além dos betões em estudo, estavam mergulhados na mesma cuba betões de outros estudos. Apesar disso, visto que nenhum dos outros betões em cura tinha adições na sua composição, considera-se que estes não terão libertado cobre ou zinco, susceptíveis de condicionar os resultados do estudo em causa.

Por outro lado, teria também sido interessante analisar a presença de outros metais para além do cobre e do zinco. No entanto, devido à inexistência de lâmpadas específicas para o espectrofotómetro, foi apenas possível analisar a presença do cobre e do zinco.

Imagens relativas às análises de lixiviação feitas às amostras de água de cura podem ser consultadas no **Anexo III**.

6. Apresentação e Análise de Resultados

6.1. Resistência à compressão

Os gráficos a seguir apresentados esquematizam os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão para as diferentes idades estudadas (7, 28 e 84 dias), para cada percentagem de adição de resíduo.

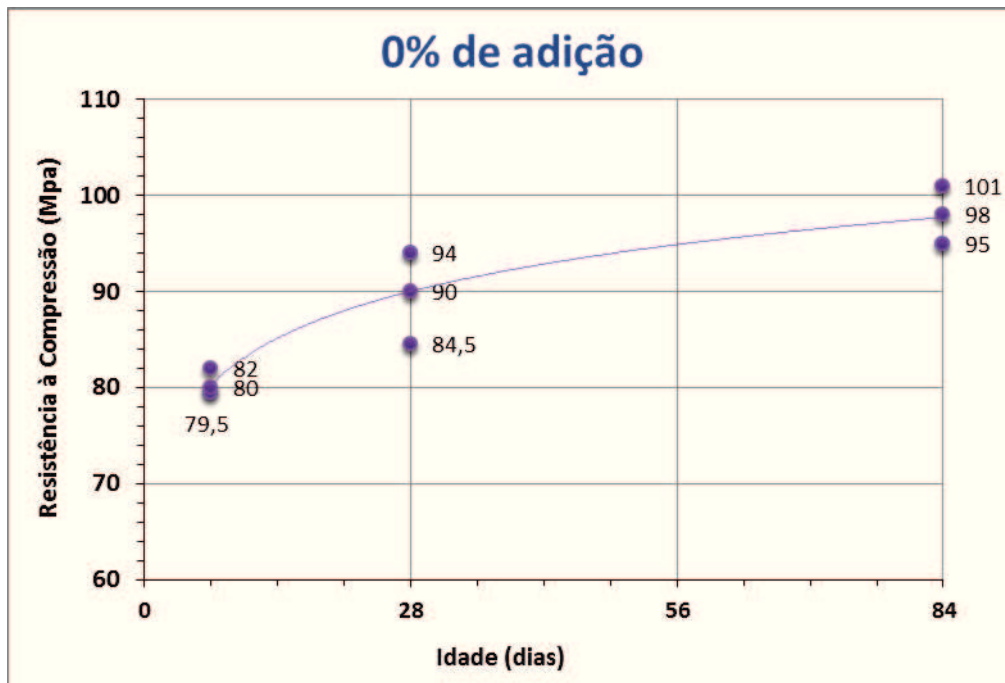


Gráfico 6: Resistências à compressão aos 7, 28 e 84 dias, para os provetes com 0% de adição de resíduo.

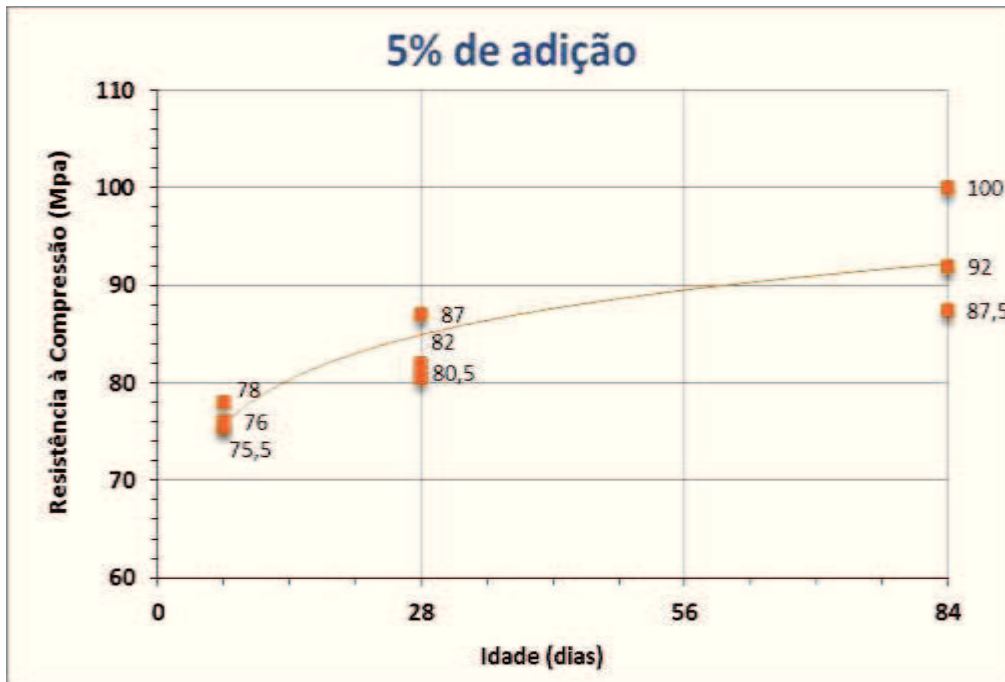


Gráfico 7: Resistências à compressão aos 7, 28 e 84 dias, para os provetes com 5% de adição de resíduo.

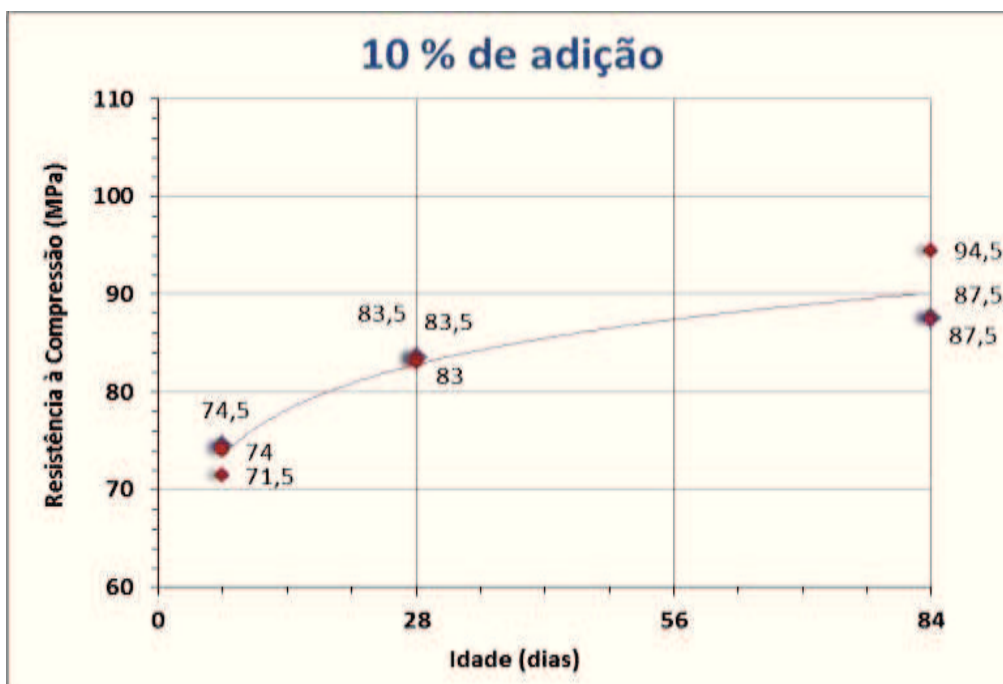


Gráfico 8: Resistências à compressão aos 7, 28 e 84 dias, para os provetes com 10% de adição de resíduo.

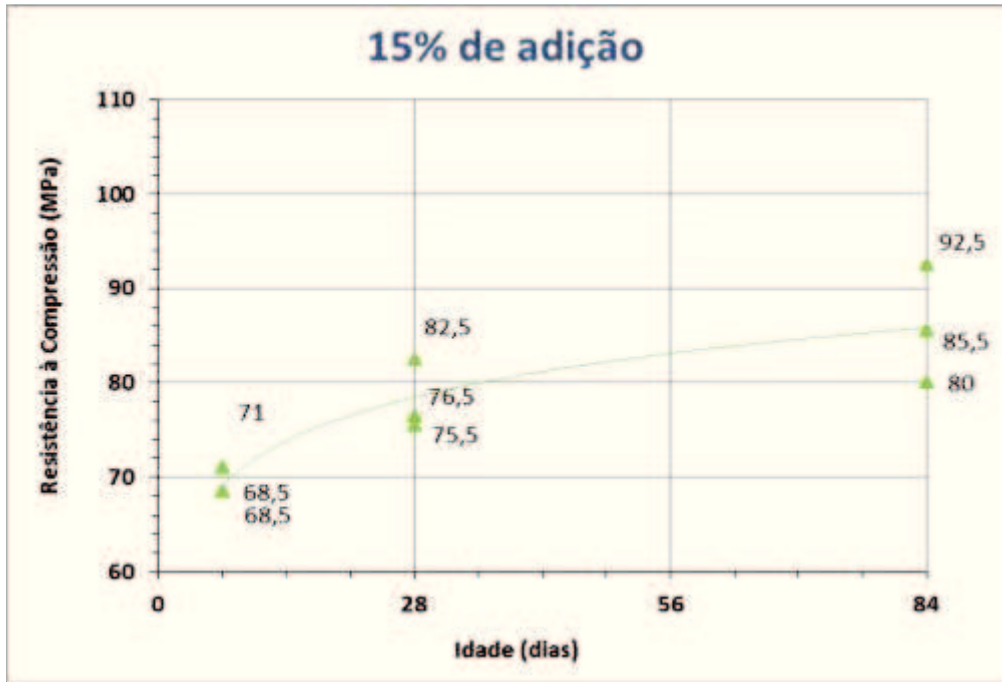


Gráfico 9: Resistências à compressão aos 7, 28 e 84 dias, para os provetes com 15% de adição de resíduo.

A análise de evolução da resistência para as diferentes percentagens de incorporação de resíduo permite observar que este não influenciou (positiva ou negativamente) o desenvolvimento da resistência no betão com o tempo. Este facto é mais evidente no **Gráfico 10** a partir dos valores de resistência média para cada formulação em diferentes idades.

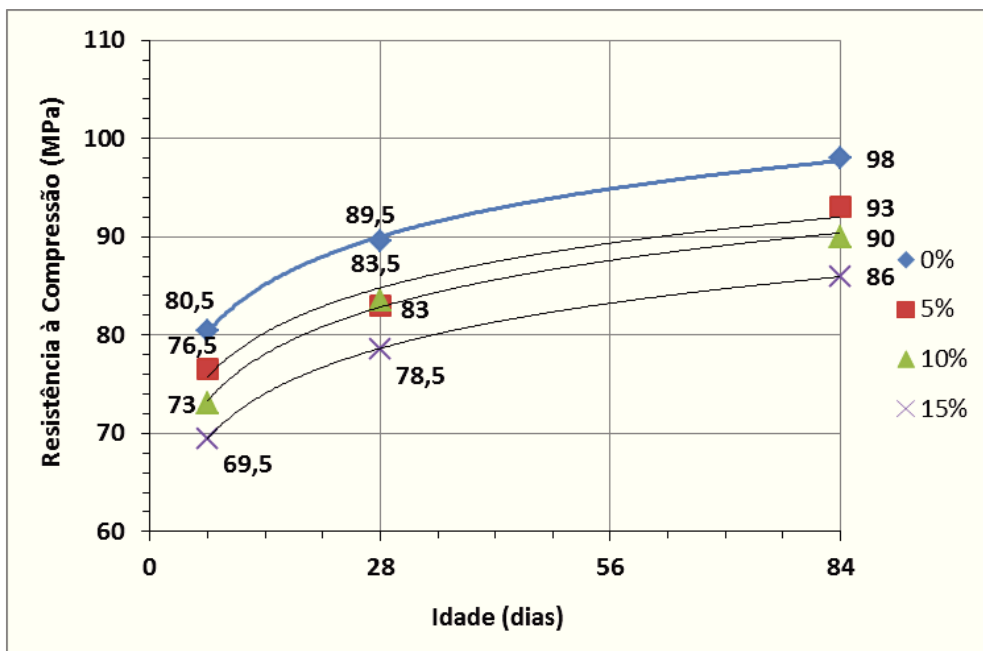


Gráfico 10: Valores médios de resistência à compressão aos 7, 28 e 84 dias, obtidos para as diferentes percentagens de adição de resíduo.

Pela análise do **Gráfico 10** destaca-se o decréscimo da resistência à compressão com o aumento da percentagem de substituição de cimento por resíduo, pelo que não se observou nenhum efeito pozolânico no resíduo. Por outro lado, verifica-se que, o betão sem adição de resíduo teve um acréscimo total de resistência à compressão de 17,5 MPa, o betão com 5% de adição teve um aumento total de 16,5 MPa de resistência, o betão com 10% de incorporação de resíduo teve um aumento de 17 MPa e, por fim, o betão com 15% de resíduo contou com um aumento total de 16,5 MPa na sua resistência. Em termos percentuais, estes valores de acréscimo de resistência correspondem a um aumento de 21,7%, 21,6%, 23,3% e 23,7% para os betões de 0%, 5%, 10% e 15% de adição de resíduo, respetivamente.

Esta análise vem reforçar o facto de que, apesar de os betões com incorporação de resíduo de vidro exibirem menores resistências à compressão que o betão de referência em estudo, essa diminuição de resistência não é muito dispare. Ainda analisando o **Gráfico 10**, constata-se que as linhas de tendência dos valores médios de resistência são todas muito paralelas, o que fundamenta que o comportamento destes betões é muito similar entre si.

Uma vez que a resistência diminuiu com a incorporação de resíduo, os valores mínimos de resistência foram obtidos pelos betões com maior adição de resíduo (15%). Comparando estes resultados com os valores máximos observados, isto é, os valores obtidos para o betão de referência (0% de adição), constata-se que se observou um decréscimo de resistência de 11MPa para os 7 e os 28 dias e um decréscimo de 12MPa aos 84 dias. Estes valores máximos de decréscimo de resistência à compressão podem ser considerados como muito pouco significativos.

No **Gráfico 11** representa-se a função de desenvolvimento da resistência à compressão ($f_{cm_i}/f_{cm_{28}}$), para as formulações ensaiadas e a função preconizada pelo Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1).

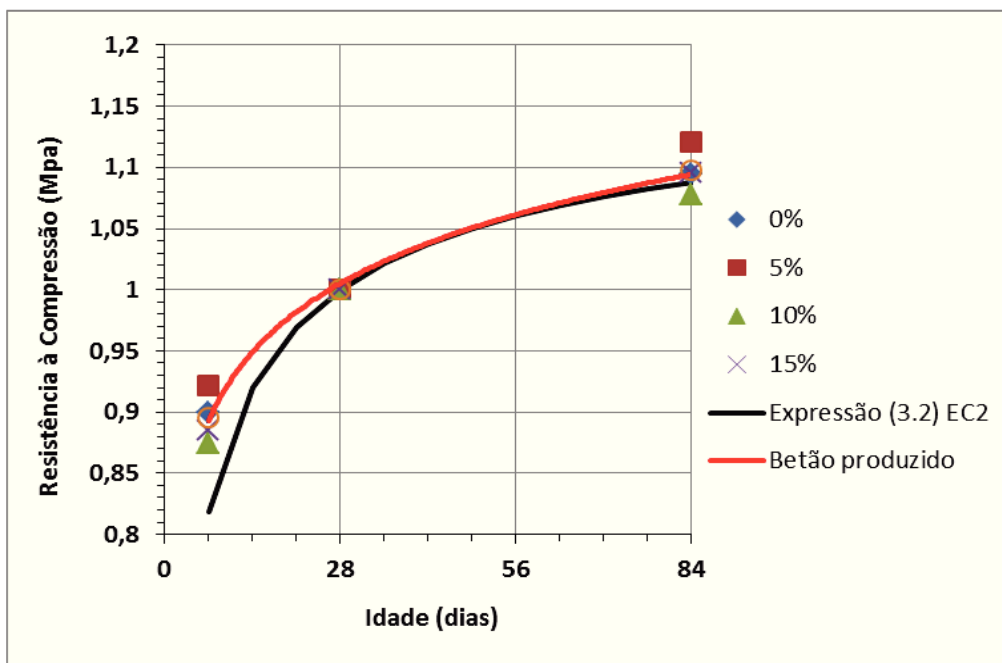


Gráfico 11: Função entre cada valor de resistência médio para cada idade e o valor médio aos 28 dias.

Destaca-se da análise deste gráfico a aproximação da expressão do eurocódigo 2 a partir dos 28 dias, apesar de em idades mais jovens subavaliar a resistência face à exibida pelos betões formulados para este trabalho.

6.2. Análises de lixiviação

Os resultados das análises de espectrofotometria aos metais cobre e o zinco, feitas às quatro amostras de água analisadas, estão esquematizados na tabela a seguir apresentada. Foram calculados os limites de deteção (L.D) para cada metal sendo que para o cobre tem-se um L.D de 0,16 mg/L e para o zinco tem-se um L.D de 0,55 mg/L.

Tabela 8: Valores de concentração (mg/L) de cada metal em estudo para as diferentes amostras de água de cura do betão analisadas.

Amostras	Cobre	Zinco
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
1	<0,16	<0,55
2	<0,16	<0,55
3	<0,16	<0,55
4	<0,16	<0,55
Branco	<0,16	<0,55

Analisando estes resultados apenas se pode concluir que os valores de cobre e de zinco se encontram abaixo dos limites de deteção, mas não se sabe se realmente existem e, caso existam, em que concentrações existem.

Um estudo anteriormente feito pelo LNEC ao resíduo das máquinas óticas da Vidrociclo, no qual o resíduo foi colocado em água que foi posteriormente analisada, obtendo-se valores de cobre e zinco também abaixo do limite de deteção, sendo que nesse estudo o limite de deteção calculado foi de 0,6 mg/L para o cobre e 0,2 mg/L para o zinco. Nesse estudo, perante esses valores foi considerado que os valores eram pouco significativos e não ocorria lixiviação. Deste modo, supõe-se que no presente trabalho os valores de concentração de metais são muito baixos e, como tal, não ocorre lixiviação de metais.

7. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Os resultados obtidos no presente trabalho estão em concordância com a maioria dos estudos já realizados neste campo. Como já foi referido no subcapítulo 5.1.1.1., na maior parte dos casos, os autores verificam um decréscimo na resistência à compressão para todas as idades estudadas. A tendência geral é que a diminuição é superior para maiores percentagens de substituição, tendência essa que também se verificou nesta investigação.

No seu estudo, Shayan (2002) refere que, esta tendência se pode dever ao facto de em pequenos períodos de tempo os efeitos pozolânicos não se tornarem evidentes.

Esta questão exposta por Shayan, levanta a questão de que, talvez para idades superiores às estudadas neste trabalho, poder-se-ia ter obtido uma perda de resistência à compressão inferior à obtida até à idade de 84 dias. Por outro lado, e de acordo com estudos realizados por outros autores, a falta de evidência de efeitos pozolânicos do resíduo pode ter-se devido à granulometria de resíduo usada que, se tivesse sido inferior aumentaria a superfície específica do resíduo.

No presente estudo, visto a perda de resistência não ter sido muito significativa, considera-se que o resíduo não influenciou a resistência. Por isto, e ainda também por não ter lixiviado os metais cobre e zinco em estudo em valores mensuráveis, o resíduo revelou-se inerte.

É importante ainda referir que, o resíduo não melhorou a propriedade estudada no entanto, pode ter melhorado outras propriedades do betão não estudadas neste trabalho.

O objetivo principal deste estudo não era criar um betão com resistências superiores ao de referência, mas sim encontrar uma alternativa para a deposição em aterro do resíduo em estudo. Assim, a pequena variação de resistência à compressão analisada, torna evidente a inviabilidade do uso do resíduo no que se refere à melhoria das propriedades do betão, porém não deixa de ser uma alternativa para a utilização do resíduo. Embora a adição de resíduo em betão não tenha levado à melhoria das propriedades em estudo, essa perda foi reduzida. No entanto, o valor a dar a um resíduo que de outra forma vai para aterro, é deveras elevado, o

que viabiliza o uso deste resíduo em betão como substituto parcial de cimento. Isto torna-se mais evidente quando se tem em conta o impacto e as graves consequências da nossa pegada ecológica.

Esta conclusão é ainda reforçada pelo facto de se considerar que não ocorreu lixiviação de cobre e zinco, o que torna esta alternativa ambientalmente viável.

Perante os resultados obtidos no presente estudo, pode-se ainda concluir que, a percentagem de 5% de substituição de cimento por resíduo é a mais vantajosa uma vez que, foi a que comprometeu menos a resistência à compressão do betão.

Este trabalho é apenas um estudo inicial sobre a possibilidade de reaproveitamento do resíduo em estudo na formulação de betões visto, a pequena quantidade de resultados disponíveis. Todavia, os resultados obtidos podem orientar pesquisas futuras neste campo.

Assim, como trabalhos futuros, propõe-se:

- Realizar um estudo semelhante mas com granulometrias de resíduo inferiores;
- Alargar os ensaios de resistência à compressão para idades superiores aos 84 dias;
- Levar a cabo programas de ensaio mais vastos que englobem a determinação da influência do resíduo noutros aspetos relacionados com a durabilidade do betão tais como, o ataque de sulfatos;
- Estudar a viabilidade do resíduo em causa como agregado em betão, isto é, em substituição de parte da areia;
- Elaborar análises de lixiviação de metais mais rigorosas, nomeadamente no que toca a colocar os betões com diferentes adições em diferentes tubas de água, para assim analisar a evolução das concentrações de metais não só com a idade mas também com a percentagem de adição;
- Alargar a análise de presença de metais a outro tipo de metais, como por exemplo o alumínio e o chumbo;
- Alargar o estudo das águas de cura do betão a outro tipo de análises, nomeadamente análises de CQO e CBO.

8. Bibliografia

8.1. Livros/ Dissertações/ Textos/ Artigos/ Apresentações

Abividro, “Manual de Reciclagem de Vidro”. Disponível em: www.sanvidro.com.br; (Consultado a 8-11-2012)

Alves, O.L., Gimenez, L.F. e Mazali, I.O., “O Vidro”, Cadernos Temáticos – Química Nova na Escola, Edição especial – Fevereiro de 2001.

Akerman, Mauro; “Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro”, CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro, Saint-Gobain, Novembro de 2000

APA, “Orientações para a identificação dos aspetos ambientais e a avaliação da sua importância”, sem data

Chang, Raymond; Química – 8ª edição, McGraw-Hill de Portugal, Março de 2005

Chen, Guohua *et al*, “Glass recycling in cement production – an innovative approach”, Waste Management 22, Pergamon, 14 de Fevereiro de 2002.

Coutinho, A. de Sousa; “Fabrico e Propriedades do Betão”, Volume I, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1997

Coutinho, J.S.; “Materiais de Construção 2”, 1ª Parte, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, 2006

Coutinho, J.S; “Betões Eco - eficientes com resíduos”, 1^{as} Jornadas de Materiais de Construção, Labest/SMC-FEUP, Porto, Portugal, 2011

Damtoft, J.S.; Lukasik,J.; Herfort, D.; Sorrentino, D.; Gartner, E.M., “Sustainable development and climate change initiatives”, Cement and Concrete Research, 2008.

Fragata, Ana; Veiga, R.; Velosa, Ana; Ferreira, V. M.; “Incorporação de resíduos de vidro em argamassas de revestimento – avaliação da sua influência nas características da argamassa”, sem data

Fernandes, M.I.G.; “Caracterização Petrográfica, Química e Física de Agregados Graníticos em Betões. Estudo de Casos de Obra”, Tese de Doutoramento em Geologia, Faculdade de Engenharia de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2005

Fernandes, P.A.L., “Vigas de Grande Vão Prefabricadas em Betão de Alta Resistência Pré-Esforçado – Viabilidade, Dimensionamento, Fabrico e Comportamento”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Especialização em Estruturas, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007

Greenberg, Arnold E.; Clesceri, Lenore S.; Eaton, Andrew D.; “Standard Methods – For Examination of Waster And Wastewater”, 18th Edition, American Public Health Association, 1992

Hasparyk, N.P.; “Investigação de Concretos Afetados pela Reação Álcali-Agregado e Caraterização Avançada do Gel Exsudado”, Tese de Doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005

IPTS, “End-of-Waste Criteria (EoW) for Waste Glass: Technical Proposals”, Working document, Seville, Spain, April 2011

Junior, L.A.B.P.; Borline, M.C.; Peixoto, R.A.F.; Oliveira, J.R.; “Adição de resíduo de manta cerâmica em argamassa”, Revista Brasileira de Ciências Ambientais – Número 21, Brasil, Setembro de 2011

Kruger, F.R.; Oliveira, D.L.A.; Braga, S.R.O.Q.; “Incorporação de vidro plano moído em substituição ao cimento e ao agregado miúdo (areia) em argamassas de concreto.”, 31ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 25ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química - SBQ, Brasil, sem data

La Serna, H.A., Rezende, M.M.; “Agregados para a Construção Civil”

Letras, João; "Reciclagem do vidro: ponto da situação e desafios para atingir a meta legal", Sociedade Ponto Verde, 7^{as} Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos, Porto, Outubro de 2011

Lopes, L.E.; Modelagem Mecânica e Numérica da Reação Álcali-Agregado com Aplicação a Barragens de Concreto, Tese de Doutoramento, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Novembro de 2004

Lucca, A.C.K.; “Reação Álcali-Agregado: Efeito do Uso de Cinza Volante”, Trabalho de diplomação para obtenção do título de Engenheiro Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, junho de 2010

MacDonald, Mott; “Sustainability of glass in construction” C. ATKINS, UK, sem data

Maltha Group, “Glass recycling Plant Asti - Technical Specification of Scope of Supply and Required Performance of Plant”, sem data (a)

Maltha Group, “Preliminary Design of Asti Glass Recycling Plant - Information required by the province of Asti”, sem data (b)

Martins, J.G, e Pinto, E.L., “O Vidro”, série Materiais, Materiais de Construção I, 1ª Edição, Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2004

Mata, T. M. C. P.; “Comparação de Processos de Reutilização/Reciclagem Usando a Metodologia de Análise de Ciclo-de-Vida”, Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, 1998

Matos, Ana Mafalda; “Estudo de Argamassas com Substituição parcial de Cimento por Resíduos de Vidro Moídos”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Materiais e Processos de Construção, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 2010

McLellan, G.W., Shang, E.B., “Glass Engineering Handbook”, McGraw-Hill, 1984

Mizumoto, C.; “Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Testemunhos de Concreto e Agregados Constituintes”, Dissertação de Mestrado, PPGEC/UNESP, Ilha Solteira, junho de 2009

Mo, X.; Yu, C.; Xu, Z.; “Long-term effectiveness and mechanism of LiOH in inhibiting alkali-silica reaction”, Cement and Concrete Research, Pergamon, 2003

Netto, R.M., “Materiais Pozolânicos”, Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, Dezembro de 2006

Nogueira, K.A.; “Reação Álcali-Agregado: Diretrizes e Requisitos da ABNT NBR 15577/2008”, Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia UFMG, Belo Horizonte, Fevereiro, 2010

Oliveira, R.B., “Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidro - Efeito de filler e pozolânico”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Setembro de 2012.

Pereira, L. A. P. e Santos, P. M. S.; “Resíduos reciclados como componentes de argamassas”, DECA – UBI, Portugal, 2007

Pinto, Abel, “Sistemas de Gestão Ambiental – Guia para a sua implementação”, Edições Sílabo, 1ª Edição, Lisboa, 2005

Pinto, A.T., “Introdução ao estudo dos Geopolímeros”, Geo-Pol – Cimento Geopolimérico, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2006

Russo, Mário A. Tavares; "A legislação nacional e os fluxos específicos dos resíduos", Novas Oportunidades na Gestão de Resíduos, Sessão 1: Enquadramento Legal da Gestão de Resíduos, Lisboa, Abril de 2009

Santos, Heraldo; "Ensaio de aderência das argamassas de revestimento", Monografia para Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, Dezembro de 2008.

Santos, M.B. e Brito, Jorge de; "O panorama nacional das reações álcalis-sílica em betões", Engenharia civil – Um, Número 32, 2008

Shayan, Ahmad; "Value-added Utilisation of Waste Glass in Concrete", Iabse Symposium Melbourne, ARRB Transport Research Vermont South Vic Aust, 2002

Shi, Caijun e Zheng, Keren; "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders", ScienceDirect – Cement and Concrete Research, Elsevier, 2005

Shi, Caijun e Zheng, Keren; "A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete", ScienceDirect - Resources Conservation & Recycling, Elsevier, 2007

Silva, C.M.; "Estudo da potencialidade de compostos à base de silanos no combate à reação álcali-agregado", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009

Silva, A.J.C; Barbosa, R.; Mota, J.M.F; Carvalho, J.R., " Concreto produzido com parte de resíduo de vidro na ilha de Fernando de Noronha-PE", Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2011, Ibracon, Florianópolis, Brasil, Novembro de 2011

Smith, William F.; "Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais", Terceira Edição, McGraw-Hill, Lisboa, 1998

Tiecher, Francieli; "Reação Álcalis-Agregado: Avaliação do Comportamento de Agregados do Sul do Brasil quando se altera o Cimento Utilizado", Dissertação de Pós-Graduação em

Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Fevereiro de 2006

Wigum, B.J.; “Alkali-Aggregate Reactions in Concrete: Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks”, NTH - University of Trondheim, Dezembro de 1995

8.2. Legislação / Normas / Especificações de ensaio

Regulamento (UE) n.º 1179 de 10 de dezembro de 2012 – Aceção da Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho

NP EN 197-1, European Standard, “Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes”, European Committee for Standardization (CEN), 2001

NP 1379, “Inertes para Argamassas e Betões – Análises Granulométricas”, Norma Portuguesa Definitiva, 1976

NP EN 12390-1, “Ensaio do Betão endurecido – Parte 1: Forma, e dimensões para ensaio de provetes e moldes”, European Committee for Standardization (CEN), “2009

NP EN 12390-2, “Ensaio do Betão Endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica, European Committee for Standardization (CEN), 2009

EN 12390-3, “Ensaio do Betão Endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, European Committee for Standardization (CEN), 2003

NP EN 1992-1-1, “Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, European Committee for Standardization (CEN), 2010

Anexo I

Tabela 9: Resumo dos AAS da Vidrociclo.

Local	Aspetos Ambientais	Impactes Ambientais	Significância
Rede viária – deslocação de veículos pesados	Consumo Combustível	Redução da disponibilidade de recursos naturais	8,0
Armazém Casco	Consumo de energia elétrica – iluminação do parque	Redução da disponibilidade de recursos naturais	6,0
Armazém Casco	Consumo de combustível – transporte de casco pela pá carregadora	Redução da disponibilidade de recursos naturais	3,0
Instalação Fabril	Produção de resíduos não valorizáveis associada à triagem de contaminação do casco	Contaminação do solo	9,0
Instalação Fabril	Consumo de energia elétrica associada á iluminação e funcionamento dos equipamentos	Redução da disponibilidade de recursos naturais	9,0

Tabela 10: Comparação das características do vidro comum com a crosta terrestre.

(Fonte: Martins e Pinto, 2004)

Óxido	% na crosta terrestre	% nos vidros comuns
SiO ₂ (Sílica)	60	74
Al ₂ O ₃ (Alumina)	15	2
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	7	0,1
CaO (Óxido de Cálcio)	5	9
MgO (Óxido de Magnésio)	3	2
Na ₂ O (Óxido de Sódio)	4	12
K ₂ O (Óxido de Potássio)	3	1

Tabela 11: Composição química de vidros comercializados.

(Baseado em: McLellan e Shang, 1984)

Vidro e utilizações	Componentes químicos (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	PbO
Vidro sodico-cálcico									
Receptentes	66-75	0,7-7	-	12-16	0,1-3	0,1-5	6-12	-	-
Chapa	71-73	0,5-1,5	-	12-15	-	1,5-3,5	8-10	-	-
Lâmpadas leves	73	1	-	17	-	4	5	-	-
Temperado	75	1,5	-	14	-	-	9,5	-	-
Vidro de Boro-silicato									
Equipamento químico	81	2	13	4	-	-	-	-	-
Farmacêutico	72	6	11	7	1	-	-	-	-
Vidro de chumbo									
Monitores CRT	54	2	-	4	9	-	-	-	23
Tubos de neon	63	1	-	8	6	-	-	-	22
Peças eletrônicas	56	2	-	4	9	-	-	-	29
Equipamento óptico	32	-	-	1	2	-	-	-	65
Vidro de bário									
Ecrãs LCD	65	2	-	7	9	2	2	2	2
Vidro de alumino-silicato									
Tubos de combustão	62	17	5	1	-	7	8	-	-
Fibra de vidro	64,5	24,5	-	0,5	-	10,5	-	-	-
Substrato para resistências elétricas	57	16	4	-	-	7	10	6	-

Tabela 12: Análise Química do resíduo das máquinas óticas, feita em Novembro de 2012 pelo laboratório alemão IGR Institut für Glas- und Rohstofftechnologie GmbH.

	Amostra 1	Amostra 2
SiO₂	72,49	72,06
Al₂O₃	1,77	1,7
Fe₂O₃	0,279	0,239
CaO	10,45	10,58
MgO	1,01	1,23
SrO	0,026	0,018
Na₂O	12,82	13,18
K₂O	0,79	0,64
Li₂O	0,004	0,003
BaO	0,053	0,046
PbO	0,0253	0,0109
As₂O₃	0,001	0,001
CdO	0,0001	0
Sb₂O₃	0,003	0,001
TiO₂	0,053	0,056
Cr₂O₃	0,07	0,068
Mn₂O₃	0,017	0,023
Co₃O₄	0,0008	0,0007
NiO	0,0006	0,0007
CuO	0,004	0,005
V₂O₅	0,001	0,001
Er₂O₃	0	0
Ce₂O₃	0,003	0,003
Bi₂O₃	0	0
MbO₃	0	0
SnO₂	0,003	0,003
ZnO	0,007	0,006
ZrO₂	0,01	0,01
SO₃	0,093	0,101

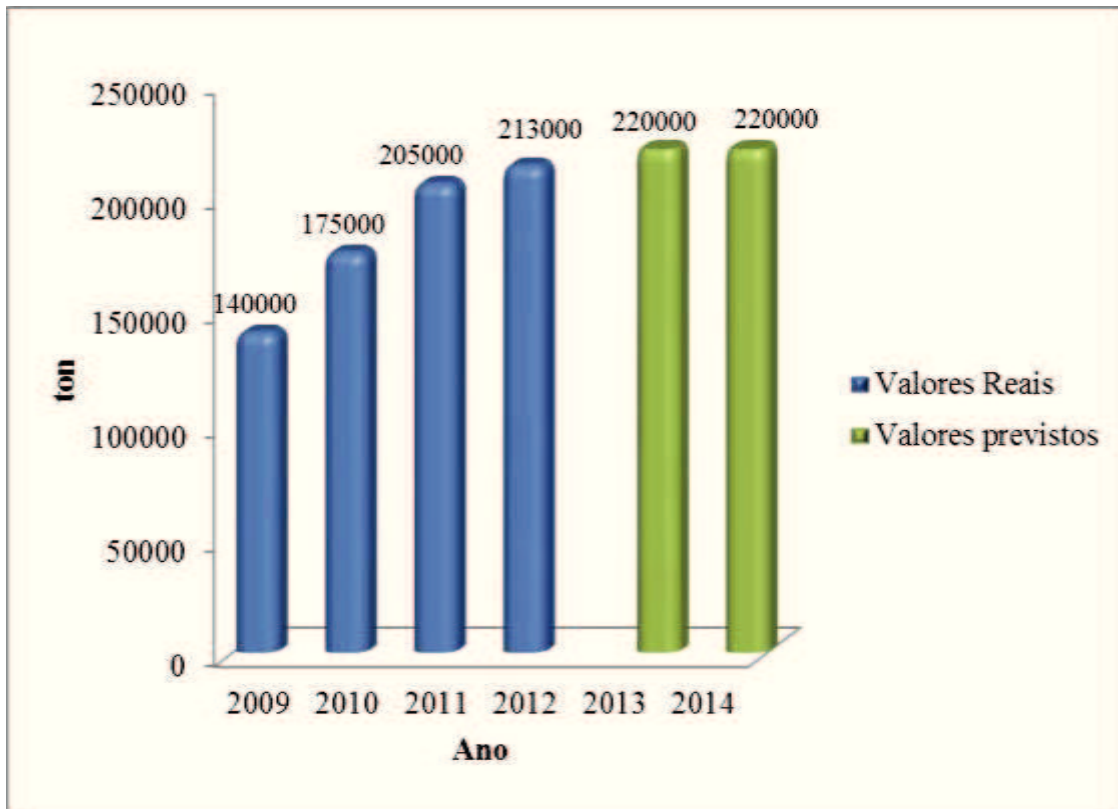


Gráfico 12: Valores de produção anual na Vidrociclo desde 2009, expressos em ton/ano.

Anexo II

II.1. Política da Qualidade, Ambiente e Segurança

Com o lema “O ciclo de vida do Vidro é a nossa profissão” na Vidrociclo promovemos o futuro do nosso ecossistema ao transformar o resíduo de vidro pós-consumo numa matéria-prima de excelência para a produção de novas embalagens de vidro. Pretendemos contribuir para a redução das emissões atmosféricas, do espaço em aterro e para a preservação dos recursos naturais, como um aliado preferencial da Industria Vidreira nacional.

A estratégia de desenvolvimento da Vidrociclo está alicerçada na melhoria contínua do desempenho dos processos que compõem o nosso sistema integrado de gestão de Qualidade, Ambiente e Segurança, suportados no comprometimento dos recursos humanos em torno de uma cultura empresarial focada na crescente satisfação das expectativas dos seus Clientes, colaboradores, fornecedores e acionistas e demais partes interessadas. Para tal estimulamos a competência e o desenvolvimento profissional dos nossos colaboradores e demais partes interessadas numa ótica de melhoria da qualidade dos nossos produtos e serviços, bem como na minimização da nossa pegada ambiental e otimização das condições de trabalho. No contexto desta atividade empresarial atuamos preventivamente na identificação, monitorização e controlo dos requisitos do Cliente tendendo à sua satisfação plena, na redução da significância dos aspetos e dos impactes ambientais tendo em conta a preservação do ambiente, bem como na eliminação ou redução dos perigos e riscos que possam afetar a saúde dos nossos colaboradores, não esquecendo a preparação adequada da capacidade de resposta face a situações de emergência. Assumimos que o cumprimento legal ou normativo aplicável, bem como de outros regulamentos subscritos pela Vidrociclo, constitui apenas e só o ponto de partida para uma relação salutar com os nossos Clientes, Fornecedores, Colaboradores e demais partes interessadas.

28 de Janeiro de 2011

Anexo III

III.1. Tecnologias da Vidrociclo



Figura 15: Silos: a) Parte frontal dos silos; b) Parte traseira dos silos.



Figura 16: Magnético



Figura 17: Ciclones



Figura 18: Escolha manual

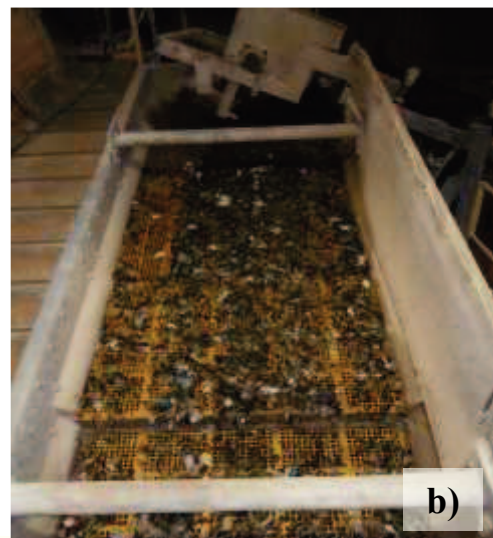


Figura 19: Crivos: a) Crivo de dedos; b) Crivo de telas



Figura 20: Máquinas de escolha ótica



Figura 21: Equipamento de corrente induzida



Figura 22: Resíduos resultantes do processo de reciclagem do vidro: a) Resíduos leves (papéis, plásticos, etc.); b) Resíduos ferrosos; c) Resíduo das máquinas óticas (resíduo em estudo neste projeto)

III.2. Análises granulométricas

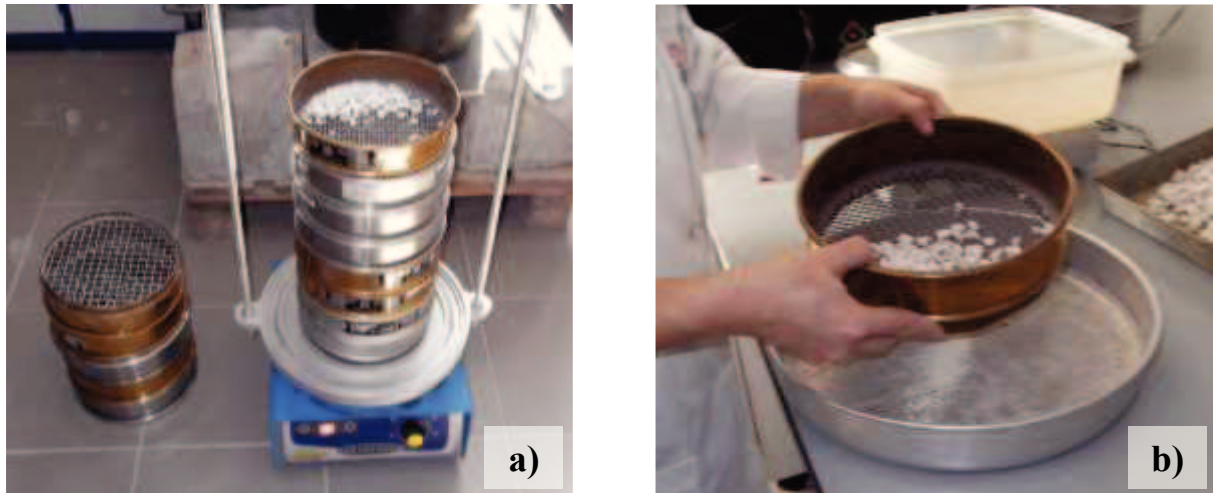


Figura 25: Crivagem de material: a) Máquina de vibração e crivos; b) Crivagem manual complementar à mecânica.

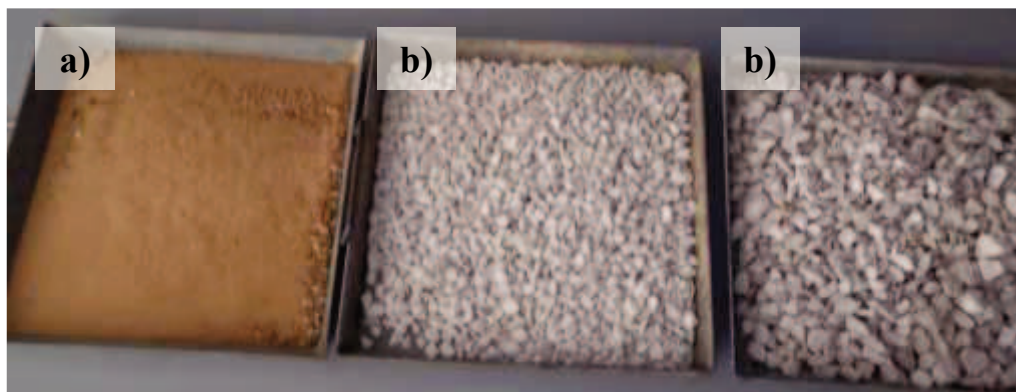


Figura 24: Agregados utilizados: a) Areia fina; b) Brita fina; c) Brita grossa.



Figura 23: Resíduo utilizado.

III.3. Produção dos betões



Figura 26: Produção dos betões: a) Adição de brita; b) Adição de areia; c) Mistura de agregados; d) Adição de cimento; e) Adição de água; f) Adição de vidro.



Figura 27: Moldagem dos cubos de betão.



Figura 28: Desmoldagem dos cubos de betão.



a)



b)

Figura 29: Cura dos betões: a) Tuba de água de cura; b) Provetes de betão submersos na água de cura.

III.4. Ensaios de resistência à compressão



Figura 30: Equipamento utilizado para a execução dos ensaios de resistência à compressão dos betões.

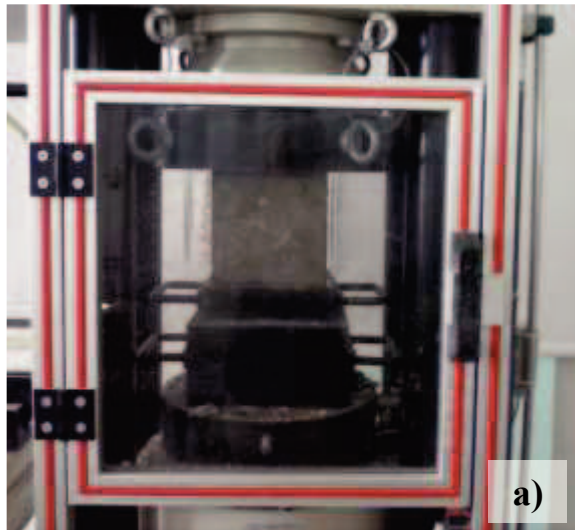


Figura 31: Execução dos ensaios de resistência à compressão: a) Colocação do provete no equipamento; b) Provete a começar a ceder às forças efetuadas pelo equipamento.

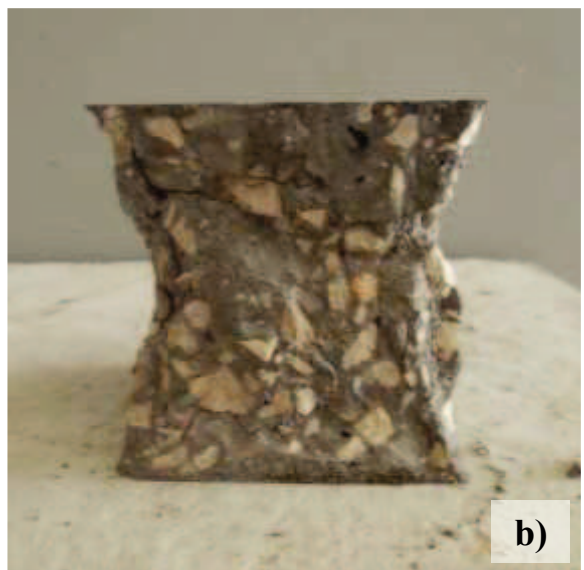
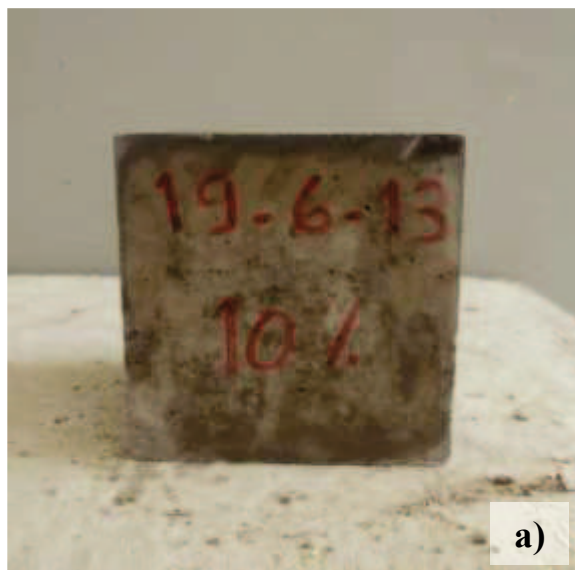


Figura 32: Provetes de betão: a) Provete de betão antes do ensaio de resistência à compressão; b) Provete de betão após o ensaio de resistência à compressão

III.5. Análises de lixiviação



Figura 33: Preparação dos padrões utilizados para a preparação das curvas de calibração: a) Pipetamento dos padrões; b) Perfazimento dos padrões com água destilada.



Figura 34: Padrões utilizados para a preparação das curvas de calibração dos metais.



Figura 35: Equipamento usado para a filtração das amostras.



Figura 36: Filtragem das amostras de água.

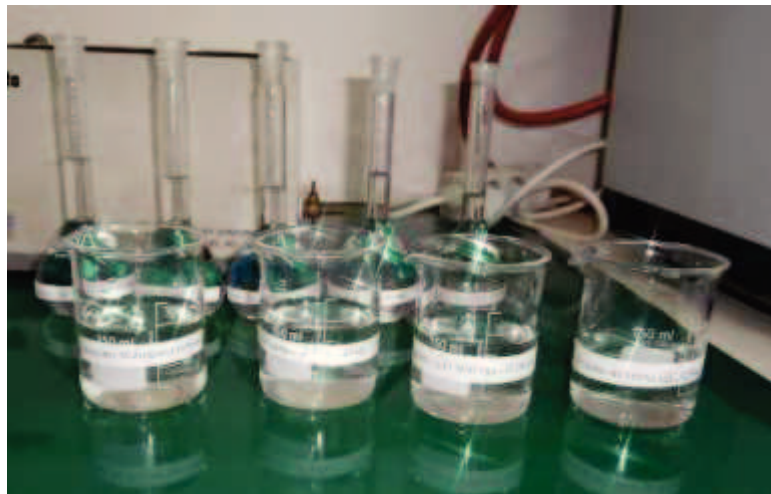


Figura 37: Amostras de água prontas a serem analisadas no espectrofotômetro de absorção atômica por chama.



Figura 38: Espectrofotometria: a) Espectrofotômetro de absorção atômica por chama utilizado; b) Análise realizada a uma das amostras.

Anexo IV

IV.1. Composições testadas para a definição da composição base

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	
Dmax (mm) =	21,3
Consistência:	S3

Compacidade:	0,830
Índ. de vazios:	0,170

ELISA FAJARDO

0% Adição

Tipo e classe de cimento:	I 42,5 R Maceira	
Quantidade de cimento (kg):		500
Massa volum. absol.do cimento (kg/ m3):		3120
Tipo de adição:	Resíduo Vidro	
Quantidade de adição (kg):		0,0
Massa volum. absol. da adição (kg/ m3):		1400
Volume absoluto (m3):		0,160
Percentagem de cimento (%):		19,3
Nome do adjuvante:	VISCOCRETE 20 HE	
Massa volum. (kg/l):	1,08	Quantidade (litros): 4,65

Volume de vazios (litros/ m3):	20
Água de amassadura (litros/ m3):	145,4

Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,485
--	-------

Volume absoluto da totalidade dos inertes (m3):	0,670
---	-------

Designação dos inertes :	Prop.	Mas.Volum.	Massas
Agr.1 Brita Grossa	0,399	2,62 kg/l	700 kg
Agr.2 Brita Fina	0,213	2,60 kg/l	370 kg
Agr.3 Areia Fina	0,388	2,60 kg/l	676 kg

1747

Massa volum. apar. betão (kg/ m3):	2397
Massa de um cubo c/ a=15cm (kg):	8,09
Volume absol. inertes grossos (m3):	0,408
Volume absoluto da argamassa (m3):	0,592
Relações:	A/ C A/ (S+C)
	0,30 0,300

Adições (%)	S/ C*100= 0,0
	S/ (S+C)*100= 0,0

Pemilagem do adjuvante :	10,0
--------------------------	------

Rel. volumétrica inertes/ cimento :	4,2
-------------------------------------	-----

Rel. volum. inertes/ (cim.+adiç):	4,2
-----------------------------------	-----

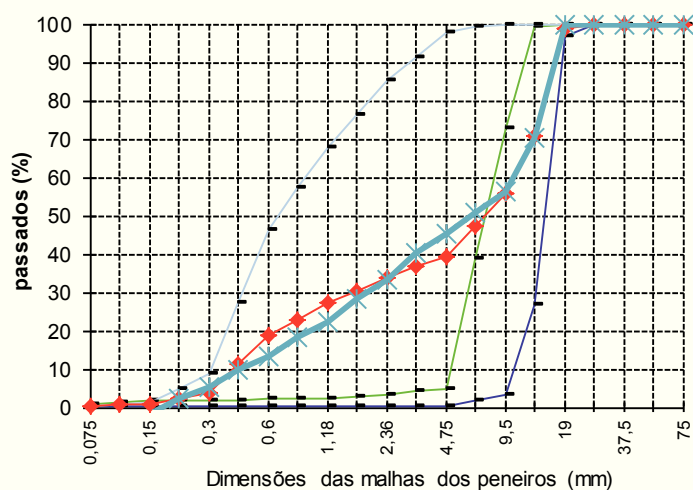
Rel. volum. in. grossos / in. finos :	1,6
---------------------------------------	-----

Previsão das resistências:		
	7 dias	28 dias
Const. Feret	340	420
Resist. (MPa):	80	99
		118

Curvas de referência de Faury

Parâmetros da curva						
A=	B=	Y=				
32	1,5	69,4				
Nº de série	malha (mm)	BG	BF	AF	Misturas	
					Refª	Real
14	0,075	0,11	0,97	0,2	-8,0	0,3
13	0,15	0,26	1,53	1,13	-18	0,9
12	0,3	0,34	1,79	8,62	5,2	3,9
11	0,6	0,39	2,13	46,37	13,3	18,6
10	1,18	0,41	2,47	67,87	22,4	27,0
9	2,36	0,41	3,11	85,11	33,0	33,9
8	4,75	0,42	4,92	97,69	45,4	39,2
7	9,5	3,34	72,79	100	56,1	55,7
6	12,5	26,99	99,31	100	70,2	70,7
5	19	96,74	100	100	100,0	98,7
4	25	100	100	100	100,0	100,0
3	37,5	100	100	100	100,0	100,0
2	50	100	100	100	100,0	100,0
1	75	100	100	100	100,0	100,0
mod.fin		6,98	6,11	2,93	5,26	5,22

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	
Dmax (mm) =	21,3
Consistência:	S3

Compacidade:	0,830
Índ. de vazios:	0,170

ELISA FAJARDO

5% Adição

Tipo e classe de cimento:	I 42,5 R Maceira	
Quantidade de cimento (kg):	.....	475
Massa volum. absol.do cimento (kg/ m3):	.....	3120
Tipo de adição:	Resíduo Vidro	
Quantidade de adição (kg):	.....	25,0
Massa volum. absol. da adição (kg/ m3):	.....	1400
Volume absoluto (m3):	.....	0,170
Percentagem de cimento (%):	.....	20,5
Nome do adjuvante:	VISCOCRETE 20 HE	
Massa volum. (kg/l):	1,08	Quantidade (litros): 4,65
Volume de vazios (litros/ m3):	20	
Água de amassadura (litros/ m3):	145,4	
Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,500	

Massa volúm. apar. betão (kg/ m3):	2371
Massa de um cubo c/ a=15cm (kg):	8,00
Volume absol. inertes grossos (m3):	0,410
Volume absoluto da argamassa (m3):	0,590
Relações:	A/C A/(S+C)
	0,32 0,300
Adições (%)	S/ C*100= 5,3
	S/(S+C)*100= 5,0
Pemilagem do adjuvante :	10,0
Rel. volumétrica inertes/ cimento :	4,3
Rel. volum. inertes/ (cim.+adiç) :	3,9
Rel. volum. in. grossos / in. finos :	1,6

Volume absoluto da totalidade dos inertes (m3):	0,660		
Designação dos inertes :	Prop.	Mas.Volum.	Massas
Agr.1 Brita Grossa	0,405	2,62 kg/l	699 kg
Agr.2 Brita Fina	0,221	2,60 kg/l	378 kg
Agr.3 Areia Fina	0,375	2,60 kg/l	643 kg

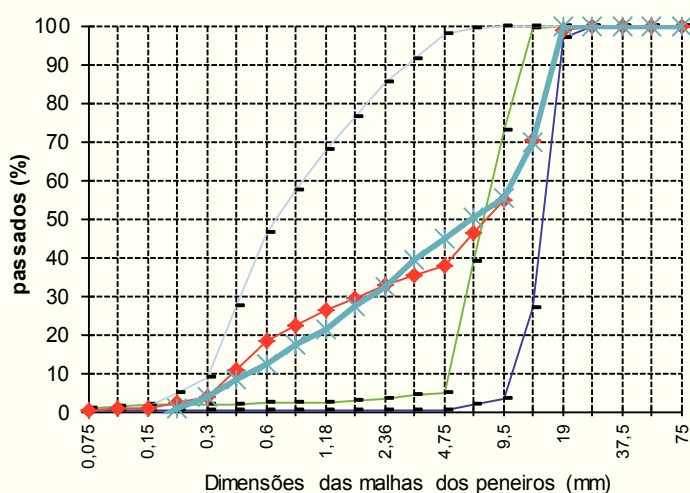
Previsão das resistências:	7 dias		28 dias
Const. Feret	340	420	500
Resist. (MPa):	85	105	125

1721

Curvas de referência de Faury

Parâmetros da curva						
A=	32	B=	1,5	Y=	69,4	
Nº de malha série	malha (mm)	BG	BF	AF	Misturas	
					Refª	Real
14	0,075	0,11	0,97	0,2	-9,6	0,3
13	0,15	0,26	1,53	1,13	-3,3	0,9
12	0,3	0,34	1,79	8,62	3,8	3,8
11	0,6	0,39	2,13	46,37	12,0	18,0
10	1,18	0,41	2,47	67,87	212	26,2
9	2,36	0,41	3,11	85,11	32,0	32,8
8	4,75	0,42	4,92	97,69	44,6	37,9
7	9,5	3,34	72,79	100	55,5	54,9
6	12,5	26,99	99,31	100	69,8	70,3
5	19	96,74	100	100	100,0	98,7
4	25	100	100	100	100,0	100,0
3	37,5	100	100	100	100,0	100,0
2	50	100	100	100	100,0	100,0
1	75	100	100	100	100,0	100,0
	mod.fin	6,98	6,11	2,93	5,34	5,27

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	
Dmax (mm) =	21,3
Consistência:	S3

Compacidade:	0,830
Índ. de vazios:	0,170

ELISA FAJARDO

10% Adição

Tipo e classe de cimento:		I 42,5 R Maceira	
Quantidade de cimento (kg):	.....	450	
Massa volum. absol.do cimento (kg/ m3):	.....	3120	
Tipo de adição:		Resíduo Vidro	
Quantidade de adição (kg):	.....	50,0	
Massa volum. absol. da adição (kg/ m3):	.....	1400	
Volume absoluto (m3):	.....	0,180	
Percentagem de cimento (%):	.....	21,7	
Nome do adjuvante:		VISCOCRETE 20 HE	
Massa volum. (kg/l):	1,08	Quantidade (litros):	4,65
Volume de vazios (litros/ m3):	20		
Água de amassadura (litros/ m3):	145,4		
Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,514		
Volume absoluto da totalidade dos inertes (m3):	0,650		
Designação dos inertes :	Prop.	Mas.Volum.	Massas
Agr.1 Brita Grossa	0,410	2,62 kg/l	699 kg
Agr.2 Brita Fina	0,229	2,60 kg/l	387 kg
Agr.3 Areia Fina	0,361	2,60 kg/l	610 kg

Massa volúm. apar. betão (kg/ m3):	2346
Massa de um cubo c/ a=15cm (kg):	7,92
Volume absol. inertes grossos (m3):	0,412
Volume absoluto da argamassa (m3):	0,588
Relações:	A/C A/(S+C)
	0,33 0,300
Adições	S/ C*100= 11,1
(%)	S/(S+C)*100= 10,0
Pemilagem do adjuvante :	10,0
Rel. volumétrica inertes/ cimento :	4,5
Rel. volum. inertes/ (cim.+adiç) :	3,6
Rel. volum. in. grossos / in. finos :	1,7

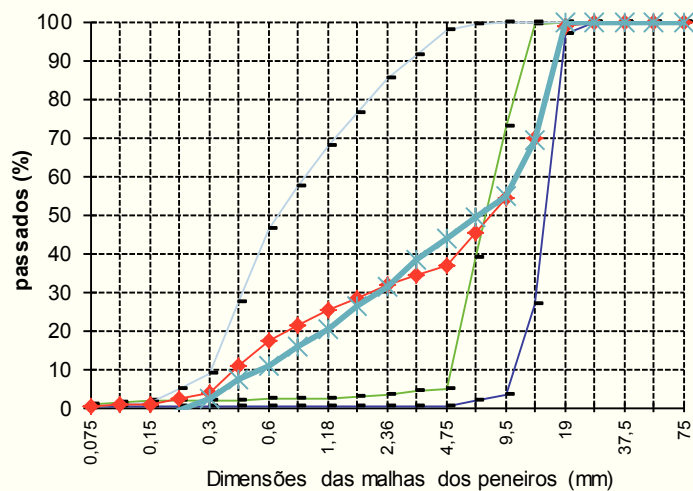
Previsão das resistências:			
	7 dias	28 dias	
Const. Feret	340	420	500
Resist. (MPa):	90	111	132

1695

Curvas de referência de Faury

Parâmetros da curva						
A=	B=	Y=				
32	1,5	69,4				
Nº de	malha	BG	BF	AF	Misturas	
série	(mm)				Refª	Real
14	0,075	0,11	0,97	0,2	-112	0,3
13	0,15	0,26	1,53	1,13	-4,9	0,9
12	0,3	0,34	1,79	8,62	2,4	3,7
11	0,6	0,39	2,13	46,37	10,7	17,4
10	1,18	0,41	2,47	67,87	20,0	25,2
9	2,36	0,41	3,11	85,11	31,0	31,6
8	4,75	0,42	4,92	97,69	43,7	36,6
7	9,5	3,34	72,79	100	54,8	54,1
6	12,5	26,99	99,31	100	69,3	69,9
5	19	96,74	100	100	100,0	98,7
4	25	100	100	100	100,0	100,0
3	37,5	100	100	100	100,0	100,0
2	50	100	100	100	100,0	100,0
1	75	100	100	100	100,0	100,0
	mod.fin	6,98	6,11	2,93	5,42	5,32

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	
Dmax (mm) =	21,3
Consistência:	S3

Compacidade:	0,830
Índ. de vazios:	0,170

ELISA FAJARDO

15% Adição

Tipo e classe de cimento:	I 42,5 R Maceira	
Quantidade de cimento (kg):		425
Massa volum. absol.do cimento (kg/ m3):		3120
Tipo de adição:	Resíduo Vidro	
Quantidade de adição (kg):		75,0
Massa volum. absol. da adição (kg/ m3):		1400
Volume absoluto (m3):		0,190
Porcentagem de cimento (%):		22,9
Nome do adjuvante:	VISCOCRETE 20 HE	
Massa volum. (kg/l):	1,08	Quantidade (litros): 4,65

Massa volúm. apar. betão (kg/ m3):	2320
Massa de um cubo c/ a=15cm (kg):	7,83
Volume absol. inertes grossos (m3):	0,415
Volume absoluto da argamassa (m3):	0,585

Relações:	A/C	A/(S+C)
	0,35	0,300

Adições (%)	S/C*100= 17,6
	S/(S+C)*100= 15,0

Pemilagem do adjuvante :	10,0
Rel. volumétrica inertes/ cimento :	4,7
Rel. volum. inertes/ (cim.+adiç):	3,4
Rel. volum. in. grossos / in. finos :	1,8

Volume de vazios (litros/ m3):	20
Água de amassadura (litros/ m3):	145,4

Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,528
--	-------

Volume absoluto da totalidade dos inertes (m3):	0,640
---	-------

Designação dos inertes :	Prop.	Mas.Volum.	Massas
Agr.1 Brita Grossa	0,416	2,62 kg/l	698 kg
Agr.2 Brita Fina	0,237	2,60 kg/l	395 kg
Agr.3 Areia Fina	0,347	2,60 kg/l	577 kg

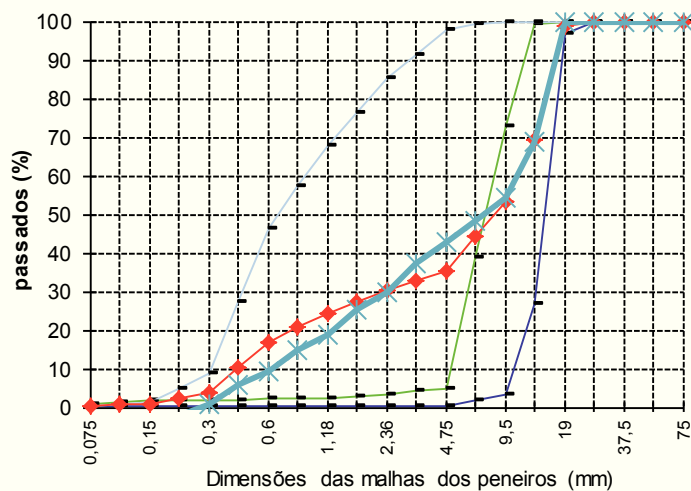
Previsão das resistências:		
	7 dias	28 dias
Const. Feret	340	420 500
Resist. (MPa):	95	117 139

1670

Curvas de referência de Faury

Parâmetros da curva						
A=	B=			Y=		
32	1,5			69,4		
Nº de série	malha (mm)	BG	BF	AF	Misturas Refª	Real
14	0,075	0,11	0,97	0,2	-12,9	0,3
13	0,15	0,26	1,53	1,3	-6,5	0,9
12	0,3	0,34	1,79	8,62	0,9	3,6
11	0,6	0,39	2,13	46,37	9,3	16,7
10	1,18	0,41	2,47	67,87	18,8	24,3
9	2,36	0,41	3,11	85,11	29,9	30,4
8	4,75	0,42	4,92	97,69	42,9	35,2
7	9,5	3,34	72,79	100	54,1	53,3
6	12,5	26,99	99,31	100	68,8	69,5
5	19	96,74	100	100	100,0	98,6
4	25	100	100	100	100,0	100,0
3	37,5	100	100	100	100,0	100,0
2	50	100	100	100	100,0	100,0
1	75	100	100	100	100,0	100,0
	mod.fin	6,98	6,11	2,93	5,51	5,37

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



IV.2. Relatórios dos ensaios de resistências à compressão

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo n.º : LB_01_06/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico: 19-06-2013

Data de Ensaio : 26-06-2013 / 11:53

Idade : 7 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra n.º: 01

Entrado em: 19-06-2013

Observações: • Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.

• Betão de referência - 0% de adição de vidro

•

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m ³)	Força (kN)	Tensão [MPa]			Tipo de rotura
	l	w	h				f _c		f _{c, dry}	
1	150	150	150	8260	2450	1790.3	79.5	....	....	s
2	150	150	150	8300	2460	1802.1	80.0	....	....	s
3	150	150	150	8260	2450	1840.8	82.0	....	....	s
Média					2450		80.5		....
Desvio Padrão					6.8		1.2		....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / In (insatisfatória de tipo n).

Prensa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado

Data _____ Ensaio _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 - Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA Telef.:244 820 300 Fax:244820310

email Laboratório de Engenharia Civil: lecivil@estg.ipleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo n° : LB_02_06/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico: 19-06-2013

Data de Ensaio : 26-06-2013 / 12:07

Idade : 7 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra n°: 02

Entrado em: 19-06-2013

Observações: • Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.

- Betão com 5% adição de vidro
-

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}	
1	150	150	150	8440	2500	1701,0	75,5	....	s
2	150	150	150	8340	2470	1751,4	78,0	....	s
3	150	150	150	8240	2440	1715,4	76,0	....	s
Média					2470		76,5		....
Desvio Padrão					29,6		1,2		....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / In (insatisfatória do tipo n).

Prensa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA Telef.:244 820 300 Fax:244820310

email Laboratório de Engenharia Civil : lecivil@estg.ipleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo nº : LB_03_06/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico : 19-06-2013

Data de Ensaio : 26-06-2013 / 12:19

Idade : 7 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra nº: 03

Entrado em: 19-06-2013

- Observações:
- Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.
 - Betão com 10% adição de vidro
 -

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}	
1	150	150	150	8460	2510	1674.4	74.5	....	s
2	150	150	150	8280	2450	1660.9	74.0	....	s
3	150	150	150	8460	2510	1608.0	71.5	....	s
Média					2490		73.0	....
Desvio Padrão					31.2		1.6	....

Notas: Tipo de rotura: S (estatística) / In (inestatística do tipo n).

Pressa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente.

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado.

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 - Morro do Lena - Apartado 4163 - 2411-901 LEIRIA - Telef.:244 820 300 - Fax:244820310

email Laboratório de Engenharia Civil : lecivil@estg.ipleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo nº : LB_04_06/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico : 19-06-2013

Data de Ensaio : 26-06-2013 / 12:28

Idade : 7 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra nº: 04

Entrado em: 19-06-2013

Observações: • Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.

• Betão com 15% adição de vidro

•

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}	
1	150	150	150	8240	2440	1639,9	68,5	....	s
2	150	150	150	8360	2480	1642,7	68,5	....	s
3	150	150	150	8300	2460	1696,7	71,0	....	s
Média					2460		69,5	....
Desvio Padrão					17,8		1,4	....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / In (insatisfatória do tipo n)

Preça em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA Telef.:244 820 300 Fax:244820310
email Laboratório de Engenharia Civil : lecivil@estg.ipleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo n.º : LB_05_07/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico : 19-06-2013

Data de Ensaio : 17-07-2013 / 10:53

Idade : 28 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra n.º: 05

Entrado em: 19-06-2013

Observações: • Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.

• Betão de referência - 0% de adição de vidro

•

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}	
4	150	150	150	8240	2440	2118,7	94,0	....	s
5	150	150	150	8360	2480	2027,1	90,0	....	s
6	150	150	150	8380	2480	1899,4	84,5	....	s
Média					2470		89,5	....
Desvio Padrão					22,8		4,9	....

Notas: Tipo de rotura: S (estatística) / In (insatisfatória do tipo n).

Prensa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012.

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente.

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado.

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA Telef.:244 820 300 Fax:244820310

email Laboratório de Engenharia Civil : lecivil@estg.ipleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo n° : LB_06_07/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico: 19-06-2013

Data de Ensaio : 17-07-2013 / 11:04

Idade : 28 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra n°: 06

Entrado em: 19-06-2013

- Observações:
- Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.
 - Betão com 5% adição de vidro
 -

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}	
4	150	150	150	8300	2460	1952,5	87,0	....	s
5	150	150	150	8340	2470	1813,1	80,5	....	s
6	150	150	150	8520	2520	1840,3	82,0	....	s
Média					2480		83,0	....
Desvio Padrão					34,7		3,3	....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / I (insatisfatória do tipo n)

Pressão em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA Telef.:244 820 300 Fax:244820310

email Laboratório de Engenharia Civil : lecivil@estg.iplleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo nº : LB_07_07/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico : 19-06-2013

Data de Ensaio : 17-07-2013 / 11:16

Idade : 28 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra nº: 07

Entrado em: 19-06-2013

Observações: • Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.

• Betão com 10% adição de vidro

•

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}	
4	150	150	150	8520	2520	1875.0	83,5	....	s
5	150	150	150	8500	2520	1862.2	83,0	....	s
6	150	150	150	8360	2480	1882,3	83,5	....	s
Média					2510		83,5	....
Desvio Padrão					25,8		0,5	....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / In (insatisfatória do tipo n)

Prensa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012.

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente.

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado.

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA Telef.:244 820 300 Fax:244820310

email Laboratório de Engenharia Civil : lecivil@estg.ipleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo n° : LB_08_07/13

Operador ; Vânia Marques

Data de Fabrico: 19-06-2013

Data de Ensaio : 17-07-2013 / 11:26

Idade : 28 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra n°: 08

Entrado em: 19-06-2013

- Observações:
- Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.
 - Betão com 15% adição de vidro
 -

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}	
4	150	150	150	8360	2480	1856,4	82,5	....	s
5	150	150	150	8420	2490	1716,9	76,5	....	s
6	150	150	150	8360	2480	1718,8	76,5	....	s
Média					2480		78,5	....
Desvio Padrão					10,3		3,6	....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / In (insatisfatória do tipo II)

Pressa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente.

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA

Telef.:244 820 300 Fax:244820310

email Laboratório de Engenharia Civil : lecvil@estg.iplleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo n.º : LB_09_09/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico: 19-06-2013

Data de Ensaio : 11-09-2013 / 11:18

Idade : 84 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra n.º: 09

Entrado em: 19-06-2013

Observações: • Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.

• Betão de referência - 0% de adição de vidro

•

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura	
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}		
7	150	150	150	8500	2520	2139,7	95,0	....	....	s
8	150	150	150	8500	2520	2271,6	101,0	....	....	s
9	150	150	150	8400	2490	2210,3	98,0	....	....	s
Média					2510		98,0		....
Desvio Padrão					17,1		2,9		....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / In (insatisfatória do tipo n)

Pressa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012.

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA Telef.:244 820 300 Fax:244820310
email Laboratório de Engenharia Civil : lecivil@estg.ipleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo nº : LB_10_09/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico: 19-06-2013

Data de Ensaio : 11-09-2013 / 11:32

Idade : 84 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra nº: 10

Entrado em: 19-06-2013

Observações: • Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.

• Betão com 5% adição de vidro

•

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m ³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}	
7	150	150	150	8360	2480	2252,7	100,0	....	s
8	150	150	150	8400	2490	1970,2	87,5	....	s
9	150	150	150	8540	2530	2066,7	92,0	....	s
Média					2500		93,0		....
Desvio Padrão					27,2		6,4		....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / In (insatisfatória do tipo n).

Prensa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012.

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente.

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado.

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA Telef.:244 820 300 Fax:244820310
email Laboratório de Engenharia Civil : leciv il@estg.ipleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo n° : LB_11_09/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico: 19-06-2013

Data de Ensaio : 11-09-2013 / 11:44

Idade : 84 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra n°: 11

Entrado em: 19-06-2013

Observações: • Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.

• Betão com 10% adição de vidro

•

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura	
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}		
7	150	150	150	8420	2490	1969.8	87,5	....	....	s
8	150	150	150	8360	2480	2123.0	94,5	....	....	s
9	150	150	150	8260	2450	1971.9	87,5	....	....	s
Média					2470		90,0		....
Desvio Padrão					23,9		3,9		....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / In (insatisfatória do tipo n)

Prensa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente.

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163

2411-901 LEIRIA

Telef.:244 820 300

Fax:244820310

email Laboratório de Engenharia Civil : lecivil@estg.iplleiria.pt

Relatório de Ensaio de Compressão *Norma EN 12390-3*

Processo n° : LB_12_09/13

Operador : Vânia Marques

Data de Fabrico: 19-06-2013

Data de Ensaio : 11-09-2013 / 11:57

Idade : 84 Dias

Obra:

Localização:

Local de extração da amostra:

Responsável pela entrega da amostra:

Amostra n°: 12

Entrado em: 19-06-2013

Observações: • Entre a data de entrega das amostras e a data de ensaio os provetes foram conservados de acordo com a norma EN 12390-2:2000.

• Betão com 15% adição de vidro

•

Identificação da Amostra	Dimensões [mm]			Massa (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão [MPa]		Tipo de rotura
	l	w	h				f _c	f _{c, dry}	
7	150	150	150	8340	2470	1925,1	85,5	....	s
8	150	150	150	8320	2470	1795,0	60,0	....	s
9	150	150	150	8400	2490	2080,8	92,5	....	s
Média					2480		86,0	....
Desvio Padrão					12,3		6,4	....

Notas: Tipo de rotura: S (satisfatória) / In (insatisfatória do tipo n)

Prensa em conformidade com a norma EN 12390-4 e calibrada pelo LNEC em Novembro de 2012

Os dados de identificação da amostra são fornecidos pelo requerente.

Este relatório de ensaio só é válido quando assinado e carimbado.

Data _____ Ensaiou _____ Verificou _____

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

Campus 2 Morro do Lena Apartado 4163 2411-901 LEIRIA Telef.:244 820 300 Fax:244820310

email Laboratório de Engenharia Civil : lecivil@estg.iplleiria.pt

IV.3. Ficha técnica do cimento utilizado

CEM I 42,5R

Cimento Portland



Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40kg

Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

95% a 100% Clinquer Portland
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem e injeção.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.

Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).

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

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele.

Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

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

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

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

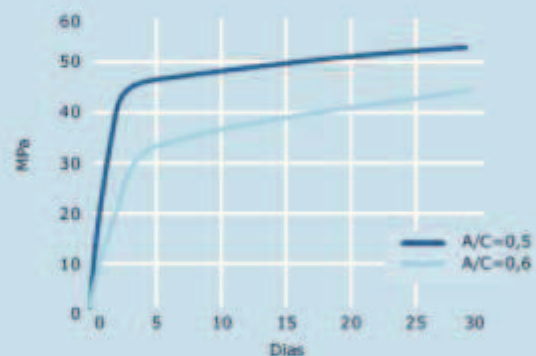
Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)		
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência
2 dias	7 dias	28 dias
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5
NP EN 196-1		

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2
Ponte de Alcaçôes do Sal.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 936 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

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

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

Cimento Branco
Tel. 244 587 700 . Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

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

IV.4. Ficha técnica do superplastificante utilizado

Ficha de Produto
Edição de Abril de 2011
Nº de identificação: 01.001
Versão nº 1
Sika® ViscoCrete® 20 HE



Sika® ViscoCrete® 20 HE

Superplastificante de alto desempenho

Construction

Descrição do produto	Sika® ViscoCrete® 20 HE é um superplastificante da terceira geração, para betão e argamassa. Cumpre os requisitos normativos como superplastificante ou redutor de água de alta gama da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2 e SIA 162 (1989).
Utilizações	Sika® ViscoCrete® 20 HE é especialmente indicado para betões onde é requerido um rápido desenvolvimento das resistências iniciais, forte redução da água de amassadura e elevada fluidez. <ul style="list-style-type: none">■ Betão prefabricado.■ Betão de rápido endurecimento.■ Betonagens onde é necessário descofrar rapidamente.■ Betão autocompactável (BAC).
Características/Vantagens	Sika® ViscoCrete® 20 HE actua sobre as partículas do ligante por dois mecanismos principais, que são a adsorção superficial e o efeito espacial. Estes dois mecanismos promovem um efeito dispersante muito intenso, permitindo uma elevada redução da água de amassadura. As propriedades daí resultantes são as seguintes: <ul style="list-style-type: none">■ Extremamente forte redução de água de amassadura.■ Excelente efeito plastificante, resultando daí uma consistência mais fluida, mais fácil betonagem e compactação.■ Aumento pronunciado das resistências iniciais, permitindo grande redução e economia no prazo de descofragem, quer em prefabricação, quer em obra.■ Menos custos de energia em vapor para a cura de elementos prefabricados.■ Especialmente adequado para a produção de betão autocompactável.■ Melhor comportamento à retracção e fluência.■ Redução do prazo de interdição de trânsito em reparações de estradas e pistas em betão. Sika® ViscoCrete® 20 HE não contém cloretos ou outros ingredientes que promovam a corrosão das armaduras, sendo portanto adequado para uso em betão armado e pré-esforçado.
Certificados/Boletins de Ensaio	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2: T3.1/3.2.
Dados do produto	
Aspecto / Cor	Líquido castanho claro, turvo.
Fornecimento	1,080 kg (1 m ³).
Armazenagem e conservação	O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada, a temperaturas entre +5 °C e +30 °C. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.
Dados técnicos	
Base química	Solução aquosa de polímeros acrílicos modificados.



Sika® ViscoCrete® 20 HE 1/3

Massa volúmica	1,08 ± 0,02 kg/dm ³ (a +23 ± 2 °C).
pH	4,3 ± 1,0 (a +23 ± 2 °C).
Teor de sólidos	40,0 ± 2,0%.
Teor em cloretos	≤ 0,1%.
Informação sobre o sistema	
Pormenores de aplicação	
Consumo/ Dosagem	Para trabalhabilidade média: 0,2 a 0,8% sobre o peso do cimento. Para trabalhabilidade elevada e para betão autocompactável: 1,0 a 2,0% sobre o peso do cimento.
Instruções de aplicação	
Mistura	Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de ² / ₃ da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energeticamente cerca de 1 minuto/m ³ ; só então será adicionada mais alguma água até à consistência desejada. Este processo conduz ao aproveitamento máximo do adjuvante e permite controlar convenientemente a razão água/ligante. Se o processo não for viável, então adicionar o produto à água de amassadura previamente determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogénea. É importante garantir um tempo mínimo de 1,5 a 2 minutos de amassadura, para obter o efeito pleno do adjuvante. Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados em seco (redução de eficácia). É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão. No caso de redosagem em obra, deve haver o cuidado de homogeneizar bem o adjuvante na massa do betão. Para isso, recomenda-se uma muito pequena adição de água no recipiente que contém o adjuvante, apenas para reduzir a sua viscosidade e facilitar a sua boa incorporação. O betão deve ser "puxado" acima e o adjuvante deve ser adicionado lentamente, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário, inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneização. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.
Aplicação	Sika® ViscoCrete® 20 HE permite o fabrico de betão de qualidade, pelo que devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, colocação e cura do betão.
Compatibilidade	Sika® ViscoCrete® 20 HE pode ser combinado com os seguintes produtos: <ul style="list-style-type: none"> ■ Sika® FerroGard® 901. ■ Sika® Pump. ■ Sika® Rapid. ■ Sikacrete®. Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.
Limpeza de ferramentas	Limpar todas as ferramentas e equipamento com água imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.

Importante	<ul style="list-style-type: none"> ■ Recomenda-se a realização de ensaios prévios para determinar a dosagem óptima do adjuvante e sempre que se alterem os componentes do betão ou a sua composição. ■ Sendo Sika® ViscoCrete® 20 HE um produto adequado para a produção de betão fluido e para betão autocompactável, a composição tem de ser estudada. ■ Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se. <p>Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.</p>
Nota	<p>Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.</p>
Risco e segurança	
Medidas de segurança	<p>Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.</p>
	<p><small>*O produto está seguro na CP Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nºCH00003018LID64), a título de responsabilidade civil do fabricante".</small></p> <p><small>A informação é em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo a aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que solicitada.</small></p>
Marcação CE	<p>A Norma Europeia EN 934-2:2003 "Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem" especifica as definições e os requisitos dos adjuvantes para uso no betão. Abrange adjuvantes para betão simples, armado e pré-esforçados usados no betão fabricado no local da obra, no betão pronto e no betão fabricado em centrais de produção de elementos prefabricados.</p> <p>Nesta norma os requisitos de desempenho aplicam-se a adjuvantes usados no betão de consistência normal. Eles podem não ser aplicáveis a adjuvantes para outros tipos de betão tais como betões meio secos e de consistência terra húmida.</p>



Sika Portugal, SA
R. de Santarém, 113 Tel. +351 22 377 69 00
4400-292 V. N. Gola Fax +351 22 370 20 12
Portugal www.sika.pt

