

ESTUDO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR RESÍDUOS DE VIDRO MOÍDOS

ANA MAFALDA MATOS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de
Sousa Coutinho

JULHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus AVÓS,
Madalena e António.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve a ajuda e apoio de algumas pessoas pelo que não ficaria completo se não fosse exprimida a gratidão a todos aqueles que contribuíram duma forma directa ou indirecta para a sua realização.

À minha orientadora, Professora Maria Joana Álvares Ribeiro de Sousa Coutinho, pelo constante apoio, incentivo e enorme disponibilidade ao longo de todo o percurso.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção, em especial ao Manuel, ao Fernando, ao Gil, à Irene, à Eng. Patrícia Pereira pela ajuda fornecida.

À D. Maria Teresa Pinto, pela sua disponibilidade e simpatia.

Ao Sr. Oliveira por nos ter cedido gentilmente o material a estudar.

A todos aqueles que me apoiaram durante o meu percurso académico e pelo apoio constante motivação e amizade que demonstraram, e pelos bons momentos, em especial à Residência Jayme Rios de Sousa.

Agradeço também a todos os Amigos, em especial, Sara, Bruna, Sónia, Graça e Mariana, que sempre acreditaram em mim e me incentivaram, e que acompanharam ao longo destes cinco anos.

E um obrigado muito especial ao Rui pela paciência, pelo carinho e dedicação que sempre teve comigo.

Mas o maior agradecimento é sem dúvida para a minha família, Mãe, Mano, e aos AVÓS Madalena e António que sempre me ajudaram no que podiam e no que não podiam também, sem eles seria impossível ter chegado até aqui. Não há palavras que agradeçam o que realmente merecem.

RESUMO

Com o avanço da indústria, as emissões de gases com efeito de estufa (GHG), principalmente dióxido de carbono, aumentaram consideravelmente. É bem conhecido que a produção de cimento Portland é uma indústria intensiva em energia, associado a uma grande quantidade de emissões de GHG (cerca de 1 tonelada de CO₂ por tonelada de clínquer produzido), sendo responsável por cerca de 5% das emissões globais de dióxido de carbono antropogénico em todo o mundo.

Uma importante contribuição para a sustentabilidade das indústrias de cimento e betão consiste na utilização de adições pozolânicas de resíduos industriais para substituir parcialmente o clínquer Portland, resultando numa economia substancial de energia, poupança de matérias-primas, a redução substancial, principalmente, das emissões de CO₂ e durabilidade.

Este trabalho teve como objectivo estudar a possibilidade de reaproveitamento de resíduos de vidro provenientes de uma indústria de reciclagem de vidro. Os resíduos de vidro foram moídos e utilizados em argamassa como substituição parcial de cimento para verificar a aplicabilidade em betão. O vidro em pó (GP) foi usado em doses de reposição de cimento de 10% e 20%. Foram produzidas argamassas, com dosagens de cimento de substituição de 0% (controle), 10%, 20% de pó de vidro e com 10% de sílica de fumo disponível comercialmente.

Os testes foram realizados em provetes de diferentes tipos de argamassa para determinar as resistências mecânicas aos 7, 28, 90 e 180 dias, bem como a propriedades relacionadas com a durabilidade, incluindo a penetração de iões cloreto, carbonatação, absorção de água por capilaridade e expansão devido à reacção álcali-sílica (ASR).

As argamassas contendo GP apresentaram melhor desempenho que o controle com relação à penetração de iões cloreto e expansão devido à ASR, melhorando com a dosagem de substituição. A absorção de água por capilaridade foi similar nas argamassas GP e CTL. Relativamente as resistências mecânicas, o GP foi menor do que o controle, aos 7 e 28 dias diminuindo com a dosagem de substituição, mas atingiu os níveis do CTL aos 90 e 180 dias. A carbonatação foi maior nas argamassas GP, como é habitual quando são utilizados materiais pozolânicos.

Este programa de investigação indica que o GP pode ser possível a utilização em betão, contribuindo assim para a sustentabilidade na construção.

PALAVRAS-CHAVE: pó de vidro, argamassa, durabilidade, adição, actividade pozolânica.

ABSTRACT

With the advance of industry, greenhouse gas emissions (GHG), specially carbon dioxide, have increased considerably. It is well known that Portland cement production is an energy-intensive industry, associated to a great amount of GHG emissions (about 1 ton of CO₂ per ton of clinker produced), being responsible for about 5% of the global anthropogenic carbon dioxide emissions worldwide.

An important contribution to sustainability of concrete and cement industries consists of using pozzolanic additions from industrial waste materials to partially replace Portland clinker resulting in substantial energy saving, raw materials savings, substantial reduction of, mainly, CO₂ emissions and durability.

This work was aimed at studying the possibility of reusing waste glass from a recycling glass industry. Crushed waste glass was ground and used in mortar as a partial cement replacement material to ascertain applicability in concrete. Glass powder (GP) was used at cement replacement dosages of 10% and 20 %.

Mortars with cement replacement dosages of 0% (control), 10%, 20 % with Glass powder (GP) and with 10% commercially available silica fume were produced. Tests were carried out on specimens of the different mortar types to ascertain strength at 7, 28, 90 and 180 days as well as durability related properties including chloride ion penetration, carbonation, water absorption by capillarity and alkali-silica reaction expansion.

Mortars containing GP performed better than control with respect to chloride ion penetrability and expansion due to ASR, improving with replacement dosage. The water capillarity absorption was similar in both GP and CTL mortars. Strength in GP samples was lower than control at 7 and 28 days decreasing with replacement dosage, but attained control levels at 90 and 180 days. Carbonation was higher for GP mortars as usual when pozzolanic materials are used.

This research program indicates that GP may be possible to use in concrete, therefore contributing to sustainability in construction.

KEYWORDS: glass powder, mortar, addition, durability, pozzolanic activity.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1.1. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA.....	1
1.1.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS.....	3
1.2. FABRICO DE CIMENTO PORTLAND E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	4
1.3. USO DE RESÍDUOS NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA	7
1.4. OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS	12
1.5. BIBLIOGRAFIA	12
2. ESTADO DA ARTE DO PÓ DE VIDRO	13
2.1. O VIDRO	13
2.1.1. O VIDRO EM PORTUGAL.....	13
2.1.2. O MATERIAL VIDRO.....	14
2.1.3. RECICLAGEM DO VIDRO.....	18
2.2. PÓ DE VIDRO COMO MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO EM ARGAMASSAS E BETÕES	21
2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	22
2.2.2. REACÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (ASR)	22
2.2.2.1. Considerações gerais.....	22
2.2.2.2. Reacção álcali-sílica e GP	26
2.2.3. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS E ACTIVIDADE POZOLÂNICA	32
2.2.4. PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....	37
2.2.4.1. Considerações gerais.....	37
2.2.4.2. Ataque por cloretos e GP	40
2.2.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA	41
2.2.6. BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DO USO DE VIDRO	42
2.3. BIBLIOGRAFIA	42

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
3.1. INTRODUÇÃO	47
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS	48
3.2.1. CIMENTO	48
3.2.2. PÓ DE VIDRO.....	49
3.2.2.1. Afinação da moagem dos resíduos de vidro	51
3.2.2.2. Características do GP.....	54
3.2.3. SÍLICA DE FUMO	56
3.2.4. AREIA NORMALIZADA CEN.....	56
3.2.5. SUPERPLASTIFICANTE SIKA VISCOCRETE 3008.....	57
3.3. ENSAIOS NAS ARGAMASSAS	57
3.3.1. COMPOSIÇÃO DE FABRICO DOS PROVETES	57
3.3.2. AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE	58
3.3.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA.....	59
3.3.4. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PRESA.....	61
3.3.5. EXPANSIBILIDADE	62
3.3.6. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	63
3.3.7. CARBONATAÇÃO ACELERADA	66
3.3.8. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	68
3.3.9. PENETRAÇÃO DE CLORETOS	73
3.3.10. REACÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (ASR)	77
3.4. BIBLIOGRAFIA	83
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	85
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	85
4.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS E PROPRIEDADES	85
4.2.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	85
4.2.2. ANÁLISES QUÍMICAS.....	86
4.2.3. GRANULOMETRIA	87
4.2.4. TRABALHABILIDADE	88
4.2.5. MASSA VOLÚMICA	88
4.2.6. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PRESA	89
4.2.7. EXPANSIBILIDADE	90
4.2.8. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS.....	90

4.2.9. ÍNDICE DE ACTIVIDADE	91
4.2.10. CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	92
4.2.11. PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS	93
4.2.12. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	94
4.2.13. REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)	95
4.3. BIBLIOGRAFIA	96

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. INTRODUÇÃO	97
5.2. VALIDAÇÃO DE RESULTADOS	97
5.2.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA	97
5.2.2. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	98
5.2.3. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....	100
5.2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA	101
5.2.5. EXPANSÃO DEVIDO À ASR	102
5.3. CONCLUSÕES GERAIS.....	103
5.4. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	105
5.5. BIBLIOGRAFIA	106

ANEXOS

ANEXO A - TRABALHABILIDADES DAS ARGAMASSAS REALIZADAS

ANEXO B - RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 7 DIAS

ANEXO C - RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 28 DIAS

ANEXO D - RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 90 DIAS

ANEXO E - RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 180 DIAS

ANEXO F - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

ANEXO G - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR UNIDADE DE SUPERFÍCIE AO LONGO DO TEMPO

ANEXO H - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DOS CLORETOS POR ENSAIO DE MIGRAÇÃO EM REGIME NÃO ESTACIONÁRIO

ANEXO I – EXPANSÕES ASR AO LONGO DE 14 DIAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Consumo de cimento a nível mundial e utilização esperada de adições para colmatar as necessidades previstas de ligante	5
Figura 1.2 – Processo simplificado do fabrico de cimento e respectivas emissões de CO ₂ de cada etapa. A espessura das setas é proporcional à quantidade de CO ₂ libertada	6
Figura 1.3 - Diagrama de materiais que podem ser reciclados em betão (World Council for Sustainable Business Development, The cement sustainability initiative: Our agenda for action)	8
Figura 1.4 - Factores responsáveis pela deterioração de estruturas de betão armado (ICE Manual of Construction Materials, Volume I)	9
Figura 1.5 - Diagrama de um modelo dinâmico usado para constatar as várias relações e sua influência na indústria ecológica do cimento (Nehdi et al., 2004)	10
Figura 2.1 - Produção de vidro em Portugal por tipo de vidro, excepto vidro em placa (Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, Instituto do Ambiente, 2007)	14
Figura 2.2 - Estrutura do vidro (Manual of Construction Materials, Volume II)	15
Figura 2.6 – Evolução da Produção de vidro na União Europeia entre 1997 e 2005 (IAPMEI, 2007)..	16
Figura 2.4 - Exemplos de aplicação do vidro (recipientes, vidro em placa, ornamentos)	17
Figura 2.5 - Ciclo de vida (infinito) do Vidro	19
Figura 2.6 – Diagrama tipo duma estação de tratamento de casco de vidro (Maltha, 1993)	20
Figura 2.7 - Influência do tamanho da partícula reactiva na expansão por RAS (Hobbs, 1988)	22
Figura 2.8 - ASR reactiva. Estados de alteração (1 a 4) de quartzo-filoneano em gel (silva, 1992).....	24
Figura 2.9 - Curvas de Expansão em barras de argamassa contendo partículas de vidro com diferentes granulometrias (Shayan & Xu, 2004)	26
Figura 2.10 - Modelo do consumo dos álcali na reacção pozolânica (Taha & Nounu, 2007)	27
Figura 2.11 - Expansão ASR segundo o ensaio da barra de argamassa (ASTM 1260)	28
Figura 2.12 - Composição química do vidro e do cimento (% por massa) e classes de finura das partículas de vidro	9
Figura 2.13 - Influência do tamanho das partículas de vidro na expansão e desenvolvimento da resistência à compressão. Barras de argamassa contendo 20% de diferentes tamanhos de partículas de vidro (78 semanas a 60°C e 100%HR)	30
Figura 2.14 - Efeito da finura do pó de vidro na expansão ASR nas barras de argamassa contende agregado reactivo C0 e C1	30
Figura 2.15 – Efeito na resistência à compressão da substituição de cimento por GP em argamassas	32
Figura 2.16– Índice de Actividade pozolânica dos pós de vidro e cinzas volantes	34
Figura 2.17 – Resistência à compressão de cilindros de betão em várias idades (Shyan & Shu, 2006)	34

Figura 2.18 – a) Resistências à flexão e compressão das argamassas após 180 dias de cura; b) Estrutura porosa das argamassas após 180 dias de cura.....	36
Figura 2.19 - Corrosão da armadura por "picadas" causada por cloretos (adaptado de Durar, 1997)	38
Figura 2.20 - Coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (NT Build 492)	40
Figura 2.21 - Valores referentes à penetração acelerada de cloretos para betão incorporando pó de vidro e cinzas volantes e para o betão de controlo	40
Figura 2.22 - Absorção de água a curto prazo (4 horas) e longo prazo (672 horas), (a) após 14 dias em cura húmida, (b) e após 90 dias em cura húmida	42
Figura 3.1 - Produto final (resíduos de vidro com diferentes dimensões, denominados também por casco)	42
Figura 3.1 - Curva granulométrica do resíduo de vidro proveniente da fábrica	48
Figura 3.2 - Cimento no MEV a) ampliado 500 vezes; b) ampliado 5000 vezes.	49
Figura 3.3 - Restos de vidros de indústrias vidreiras que chegam à fábrica de reciclagem	50
Figura 3.4 - Vista do sistema automático de britagem e moagem	50
Figura 3.5 - Produto final (resíduos de vidro com diferentes dimensões, denominados também por casco).....	51
Figura 3.6 - Curva granulométrica do resíduo de vidro proveniente da fábrica	52
Figura 3.7 - Moagem dos resíduos no moinho de bolas	52
Figura 3.8 - Curva granulométrica laser do GP moído 4 horas.....	53
Figura 3.9 - Curva granulométrica laser do GP moído 27 horas.....	53
Figura 3.10 - Curva granulométrica laser do GP moído 48 horas.....	53
Figura 3.11 - Pó de vidro moído 48 horas	54
Figura 3.12 - Resultado do Ensaio de Pozolanicidade	55
Figura 3.13 - a) Sílica de fumo utilizada; b) Sílica de fumo ampliada 40000 vezes no MEV.....	56
Figura 3.14 - Amassadura de uma argamassa normalizada	57
Figura 3.15 - Medição da trabalhabilidade	58
Figura 3.16 - Misturador do LEMC	58
Figura 3.17 - Compactação (60 pancadas num minuto)	59
Figura 3.18 - a) Medição do tempo de fim de presa com o aparelho de Vicat; b) Marcas da agulha com anel no provete para medição do tempo de fim de presa	62
Figura 3.19 - a) Provete imerso em água em ebulição. b) Provete à temperatura ambiente, após ter estado em água em ebulição 3 horas	62
Figura 3.20 - Provete prismático (40x40x160mm).....	63
Figura 3.21 - Ensaio de resistência, flexão (a) e compressão (b)	64
Figura 3.22 - Resistência à flexão nas argamassas aos 7, 28, 90 e 180 dias.....	65

Figura 3.23 - Resistência à compressão nas argamassas aos 7, 28, 90 e 180 dias de idade	64
Figura 3.24 - Carbonatação ao fim de cerca de 2 meses.....	67
Figura 3.25 - Carbonatação ao fim de cerca de 4 meses.....	67
Figura 3.26 - Profundidade de carbonatação média das argamassas.....	68
Figura 3.27 - Esquema do ensaio de capilaridade e pormenor da entrada e saída da água no reservatório dos provetes.....	71
Figura 3.28 - Rectas de absorção-tempo (4h30m)	72
Figura 3.29 - Provetes cilíndricos de CTL.....	73
Figura 3.30 - Ensaio de penetração acelerada por cloretos. a) Equipamento para o ensaio de migração em regime não estacionário; b) Câmara de vácuo	74
Figura 3.31 - Profundidade de penetração de cloretos (parte mais clara)	75
Figura 3.32 - Compactação dos moldes para o ensaio de penetração de cloretos	75
Figura 3.33 - Coeficiente de difusão de cloretos (média de 3 provetes para cada argamassa)	77
Figura 3.34 - Compactação da argamassa no molde do ensaio ASR.....	78
Figura 3.35 - Provetes em banho-maria e submersos em NaOH nos recipientes	79
Figura 3.36 - Sequência da medição da expansão de um provete	80
Figura 3.37 - Curva expansão tempo do ensaio ASR	82
Figura 4.1 - Índice de actividade pozolânica das argamassas com adições de SF e GP.....	92
Figura 4.2 - Especificação LNEC E- 463	96
Figura 5.1 - Comparação geral de resultados.....	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química de vidros comercializados (McLellan & Shand, 1984)	17
Tabela 2.2 - Emissões efectivas de CO ₂ na produção de vidro (Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, Instituto do Ambiente, 2007)	18
Tabela 2.3 - Métodos de ensaio para avaliação da reactividade aos álcali de agregados para betão (Silva et al, 2008)	25
Tabela 2.4 - Composição das argamassas usadas no estudo de Corinaldesi et al	35
Tabela 2.5 - a) Resistência à penetração de cloretos baseada nos resultados do ensaio NT Build 492; b) Penetração de cloretos de acordo com a carga passada através dos provetes-RCP.	39
Tabela 3.1 - Composição química do cimento utilizado (disponibilizada pela Secil)	49
Tabela 3.2 - Comparação das dimensões características do cimento e do GP moído 48h.....	54
Tabela 3.3 - Resultados das análises químicas do GP	55
Tabela 3.4 - Granulometria da areia Normal (NP EN 196-1)	56
Tabela 3.5 - Composição dos provetes de argamassa	56
Tabela 3.6 - Trabalhabilidades das argamassas numa das amassaduras realizada.....	59
Tabela 3.7 - Massas volúmicas determinadas para o cimento, SF e GP	60
Tabela 3.8 - Tempos de início e fim de presa	61
Tabela 3.9 - Expansibilidade das pastas em centímetros	62
Tabela 3.10 - Profundidade carbonatada da cada espécie de argamassas	67
Tabela 3.11 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade.....	69
Tabela 3.12 - Coeficiente de difusão de cloretos.....	75
Tabela 3.13 - Expansões médias ao fim de 14 dias	79
Tabela 4.1 - Requisitos químicos dos cimentos (NP EN 197-1)	86
Tabela 4.2 - Requisitos químicos das pozolânas (NP 4220) e verificação de conformidade do GP ...	87
Tabela 4.3 - Dimensão característica das amostras em que d(X%) é o diâmetro em que X% das partículas tem dimensão inferior a d	87
Tabela 4.4 - Dimensão característica das amostras.....	86
Tabela 4.5 - Trabalhabilidade média das argamassas	88
Tabela 4.6 - Requisitos físicos das pozolânas (NP 4220)	89
Tabela 4.7 - Valores característicos resultantes do autocontrolo efectuado pelo fabricante (NP EN 197-1)	90
Tabela 4.8 - Resultados e desempenho da resistência à compressão	91
Tabela 4.9 - Classes de pozolanicidade e respectivas composições do ligante da argamassa normal (NP 4220)	91

Tabela 4.10 - Índices de Actividade das pozolâneas e comparação com o mínimo exigido.....	92
Tabela 4.11 - Resultados e desempenho do ensaio da carbonatação acelerada.....	93
Tabela 4.12 - Classe de resistência à penetração de cloretos no betão (ENV 2006)	93
Tabela 4.13 - Valores do coeficiente de penetração de cloretos em regime não estacionário e respectivo desempenho.....	94
Tabela 4.14 - Coeficientes de absorção em betão (Coutinho, 2007)	94
Tabela 4.15 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade e respectivos desempenhos.....	95
Tabela 4.16 - Expansão ASR e respectivo desempenho.....	95
Tabela 5.1 - Composição química do GP usados por vários autores (apenas se apresentam os componentes com relevância)	97
Tabela 5.2 - Desempenho das resistências mecânicas de betões ou argamassas com adição de GP obtidos por vários autores	97
Tabela 5.3 - Desempenho da resistência à penetração de cloretos de betões ou argamassas com adição de GP obtidos por vários autores	98
Tabela 5.4 - Desempenho da resistência absorção de água de betões ou argamassas com adição de GP obtidos por vários autores	99
Tabela 5.5 - Desempenho relativo à ASR (em termos de expansão) de betões ou argamassas com adição de GP obtidos por vários autores	100
Tabela 5.6 - Comparação geral dos resultados obtidos.....	102

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

μm – micra

ASR – Reacção álcalis-sílica

ASTM - American Society for Testing and Materials

BAC – Betão auto-compactável

C_2S – Silicato bicálcico

C_3S – Silicato tricálcico

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de cálcio

CEM I 42,5 R – Cimento Portland da classe I 42.5 R

CEMUP – Centro de Materiais da Universidade do Porto MEV – Microscópio Electrónico de Varrimento

CH_4 – metano

CO_2 – Dióxido de Carbono

COV – compostos orgânicos voláteis

CSH – Gel de Silicato de Cálcio Hidratado

CTL – Controlo (0% de substituição, 100% cimento)

Dns – Coeficiente de Difusão Aparente [m^2/s]

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GHG – Gás com Efeito de Estufa

GP – Pó de Vidro (do inglês Glass Powder)

GP 20 – Pó de vidro com 20% de substituição na massa do cimento

GP10 – Pó de vidro com 10% de substituição na massa do cimento

HR – Humidade relativa (%)

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

LEMC – Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MPa – Mega Pascal

MEV – Microscópio Electrónico de Varrimento

N – mol(es)

N_2O – óxido nitroso

NaCl - Cloreto de sódio

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ – teor em álcali equivalente

NaOH - Hidróxido de sódio

° C – Graus centígrados

R 7 – Ensaio de resistência mecânica aos 7 dias

R 28 – Ensaio de resistência mecânica aos 28 dias

R 90 – Ensaio de resistência mecânica aos 90 dias

R 180 – Ensaio de resistência mecânica aos 180 dias

RCP – Ensaio de penetração rápida de cloretos

S – Coeficiente de Absorção [$\text{mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$]

SF – Sílica de fumo com 10% de substituição na massa do cimento

SiO₂ – Oxido silício

t ou ton – Toneladas

UE – União Europeia

V – Volts

w/c – Razão água/cimento

1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

As economias modernas consomem recursos naturais (matérias-primas) de forma crescente na produção de bens e serviços. A contabilização de fluxos de recursos naturais, incluindo processos de extracção, produção, fabricação, reciclagem e deposição final, revela também uma crescente preocupação para o facto do ambiente ser o destino final de todos os resíduos gerados. Esta temática tem recebido grande atenção devido à integração entre a economia e o ambiente: *Jänicke et al.* referem que “a esperança para uma reconciliação entre a economia e ecologia reside, em grande medida, na premissa de que um decréscimo da entrada de recursos na economia irá conduzir a uma redução na quantidade de emissões e resíduos, e também nos custos de produção” (*Pereira, 2006*).

Ao longo da História, o ser humano sempre viveu à mercê do ambiente. Os nossos antepassados só tiveram de enfrentar as variações sazonais do clima, os desastres naturais e as variações climáticas a longo prazo. No entanto, as pessoas, à medida que foram limpando terras para as suas culturas, desviando cursos de água para a irrigação e, posteriormente, construindo vilas e cidades, começaram a produzir um impacto crescente no mundo que as rodeia (*Comissão Europeia do Ambiente*).

Mesmo assim, só depois do advento da Revolução Industrial as actividades humanas começaram a afectar o ambiente a nível global. O controlo da energia contida nos combustíveis fósseis constituiu um grande passo em frente, mas teve o seu preço. As actividades industriais desempenham um papel verdadeiramente importante no bem-estar económico da sociedade, contribuindo para o crescimento sustentável. Contudo, essas mesmas actividades também têm um impacto significativo no ambiente, que não é de todo benéfico (*Comissão Europeia do Ambiente*).

O efeito de estufa é causado pelos “gases de estufa”, gases como o dióxido de carbono, o vapor de água, o metano, entre outros, que evitam que o calor solar absorvido pela superfície terrestre se escape para o espaço. A atmosfera terrestre contém vapor de água, dióxido de carbono, óxidos de azoto e metano. Esses gases formam uma camada transparente que actua como o vidro numa estufa gigantesca. A luz solar consegue atravessar essa camada para vir aquecer a superfície terrestre, mas o calor resultante tem alguma dificuldade em voltar a sair. Tal como o interior de uma estufa aquece nos dias quentes, assim também aquece a atmosfera terrestre. Sem o efeito de estufa, o nosso planeta seria frio ao ponto de tornar impossível a nossa própria existência. Ao longo dos últimos 150 anos, tem-se vindo a queimar quantidades cada vez maiores de carvão, petróleo e gás natural. As enormes quantidades de dióxido de carbono que se libertam para a atmosfera aumentaram de forma gradual o efeito de estufa. A maior parte dos cientistas concorda que esse fenómeno resultou no aumento da

temperatura média da atmosfera terrestre. Portanto é conveniente controlar o efeito de estufa. Esse fenómeno poderá resultar na alteração do clima em muitas partes do Mundo. Estes factores contribuem não só para a poluição das cidades como também podem levar a problemas graves de saúde. A poluição do ar é cada vez mais citado como a principal causa de doenças pulmonares como asma - o dobro de pessoas sofrem de asma hoje, em comparação a 20 anos atrás (*Comissão Europeia do Ambiente*, 2005).

As maiores instalações industriais representam uma parte considerável das emissões totais dos principais poluentes atmosféricos (83% do dióxido de carbono (CO₂), 34% de óxidos de azoto (NO_x), 43% de pó e 55% para os compostos orgânicos voláteis (COV) (*Comissão Europeia do Ambiente*).

Em comparação com a era pré-industrial (antes de 1750), concentrações de até 2007 das emissões de CO₂, metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) aumentaram 38%, 155% e 15%, respectivamente.

O Painel Internacional sobre as Alterações Climáticas (IPCC), um organismo das Nações Unidas, que junta milhares de peritos em clima de todo o mundo, prevê que a temperatura global média aumentará entre 1,8 e 4°C – e no pior cenário, 6,4°C – até 2100, a não ser que se tomem medidas para limitar as emissões dos gases de efeito de estufa (*Comissão Europeia do Ambiente*).

Entre os efeitos das alterações climáticas, destacam-se (*Rumo à celebração em Copenhaga de um acordo abrangente sobre as alterações climáticas*, Comissão Europeia do Ambiente, 2008):

- O aumento dos fenómenos climáticos extremos: cheias, ondas de calor e períodos de seca;
- A subida do nível do mar;
- O desaparecimento de ecossistemas em larga escala.

Se nada for feito, o impacto socioeconómico das alterações climáticas na economia mundial poderá exceder em muito o da actual crise financeira e recessão económica. Para evitar o pior, é necessário que as emissões de gases com efeito de estufa proveniente das actividades humanas parem de aumentar na próxima década e diminuam à escala mundial (segundo os cientistas, até 2050, deveria haver uma redução de pelo menos 50% em relação aos níveis de 1990).

Ao longo dos últimos 15 anos, a União Europeia tem apoiado dezenas de projectos cujo objectivo é aumentar o nosso conhecimento das relações entre o efeito de estufa e o aquecimento global. Os programas de investigação da UE nos domínios do ambiente, do clima e da investigação marinha convenceram o mundo de que a influência humana sobre o ambiente global é um dos principais desafios do futuro e, em 1997, na Conferência de Quioto, no Japão, a Europa deu o seu apoio a medidas internacionais para a redução das emissões dos gases responsáveis pelo efeito de estufa.

O Protocolo de Quioto estipula limites sobre as emissões de gases com efeito de estufa dos países industrializados. Também introduz mecanismos inovadores baseados nos mercados – designados mecanismos de Quioto flexíveis – destinados a manter os custos da redução de emissões tão baixos quanto possível.

Em Dezembro de 2007, na Conferência das Nações Unidas sobre alterações climáticas realizada em Bali, todos os grandes países aceitaram iniciar negociações sobre um novo regime global para lidar com a mudança do clima a partir de 2012, quando expira o protocolo de Quioto. No ano seguinte, em Poznan, na Polónia, continuaram a registar-se progressos e as negociações em curso visavam a celebração de um acordo no final de 2009, durante a Conferência das Nações Unidas sobre alterações climáticas realizada em Copenhaga. Os países envolvidos nas negociações acordaram que é necessário efectuar reduções drásticas para manter as alterações climáticas dentro de limites seguros.

Contudo, apesar da redução em algumas emissões nocivas, a qualidade do ar continua a causar problemas. Claramente, mais precisa ser feito a nível local, nacional, europeu e internacional.

Não obstante, outro problema grave relacionado com as emissões de gases poluentes para a atmosfera é a acidificação do meio ambiente, ao alterar quimicamente os solos e a água, condiciona o desenvolvimento das espécies vegetais e animais, alterando o equilíbrio dos ecossistemas. A acidificação, na prática, é provocada pelas chuvas ácidas, que são formadas na atmosfera a partir dos óxidos de azoto e de enxofre, emitidos pela combustão do carvão, da gasolina e de outros combustíveis fósseis

1.1.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS

Os resíduos são definidos como produtos não utilizados gerados pela actividade da vida humana, actividade social e industrial.

Com o avanço da actividade industrial e a melhoria das condições de vida, a quantidade de resíduos gerados pela sociedade tem aumentado continuamente e o tratamento e eliminação de resíduos é um grave problema.

O volume total de resíduos produzidos anualmente na Europa é de cerca de 2 000 milhões de toneladas. Mais de 40 milhões de toneladas desses resíduos são classificados perigosos (*Comunidades Europeias*, 2000). As principais fontes de resíduos são a agricultura, o sector da construção, a indústria, a exploração mineira e as zonas urbanas. Os resíduos agrícolas ocupam o primeiro lugar em termos de quantidade e os resíduos industriais são os mais significativos em termos de impacto ambiental (*Comunidades Europeias*, 2000).

Quando os resíduos devem ser eliminados, a escolha que se coloca é entre a deposição em aterro ou a incineração. Nenhuma destas soluções é perfeita, sendo ambas potencialmente nocivas para o ambiente e a saúde humana. Por outro lado, devido à escassez de terras para a eliminação, a complexidade do tratamento para tornar os resíduos inofensivos e os elevados custos de tratamento e eliminação de resíduos, é fundamental encontrar usos para os diversos resíduos gerados, uma vez que a reciclagem total ou parcial significa que o volume de resíduos a eliminar é inferior e que a utilização de matérias-primas também é menor. A melhor opção consiste em reduzir, pura e simplesmente, o volume total de resíduos produzidos (*Comunidades Europeias*, 2000).

Os resíduos ou subprodutos decorrentes da actividade industrial são os que apresentam, à partida, maior dificuldade de manuseamento, pela sua complexidade e potencial toxicidade. Representam grandes perdas económicas e acarretam impactos negativos de natureza ambiental e social, dado que a sua reintrodução no processo produtivo é muitas vezes difícil ou mesmo impossível. Contudo, estudos recentes demonstraram que uma ampla variedade de resíduos pode substituir os materiais convencionais. Tal facto tem alertado as indústrias para o desenvolvimento de alternativas tecnológicas, ao nível do processamento e até mesmo do consumo de matérias-primas, a fim de poupar recursos para as gerações futuras e preservar o ambiente. Em alguns casos, surgiu a oportunidade de desenvolver novos materiais e novos produtos, com características físicas e mecânicas semelhantes ou até mesmo melhoradas quando comparadas aos materiais e produtos convencionais (*Pereira*, 2006).

Apesar da existência de grandes quantidades de resíduos industriais, como a escória de alto-forno, cinzas volantes, sílica de fumo, escórias de metais não-ferrosos e resíduos agrícolas como a cinza da casca de arroz, que têm sido utilizados há muitos anos em grande quantidade como matérias-primas e componentes na indústria do cimento, existem ainda muitos outros resíduos sobretudo industriais não utilizados ainda. Por exemplo, os resíduos combustíveis, tais como pneus usados, óleos, lamas,

borracha, plásticos, madeira, subprodutos agrícolas e resíduos inflamáveis, tais como, os resíduos de carvão e cinzas de alumínio, lamas e resíduos de areia de moldagem e cinza de incineração do lixo urbano.

1.2 FABRICO DE CIMENTO PORTLAND E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

O betão é o material de construção mais vulgarmente utilizado no mundo, a seguir à água é o segundo produto mais consumido no planeta. Cada ano a indústria de betão usa 1,6 bilhões de toneladas de cimento, 10 bilhões de toneladas de rocha e areia, e 1 bilhão de toneladas de água. Cada tonelada de cimento produzida requer 1,5 toneladas de calcário e consumos energéticos fósseis (Mehta, 2002). E prevê-se que o seu uso deverá duplicar nos próximos 30 anos (EcoSmart Betão, 2009).

O cimento é um ingrediente vital para a construção e indústrias de construção uma vez que faz de ligante do betão. Apesar do cimento compreender apenas 10-15% da massa de betão, este componente desempenha um papel importante determinante no custo do betão, no seu impacto ambiental, e nas propriedades do betão fresco e endurecido. O cimento é também o ingrediente do betão que produz a maior carga ambiental. Em 2006, mais de 2 bilhões de toneladas de cimento Portland foram consumidos em todo o mundo (*Materials for Sustainable Sites A Complete Guide to the Evaluation Selection and Use of Sustainable Construction Materials*). Em Portugal estudos recentes apontaram para uma produção de 12.6Mt em 2008. (Gurmendi, 2010)

Devido à importância de cimento como material de construção e a abundância geográfica da principal matéria-prima (por exemplo, calcário), o cimento é produzido em praticamente todos os países. Os principais produtores são os grandes países (por exemplo, China e Índia) ou regiões e países com uma economia desenvolvida, como a União Europeia, os Estados Unidos e Japão. Globalmente, mais de 150 países produzem cimento e/ou clínquer (Worrell).

O gráfico da Figura 1.1 mostra o consumo mundial de cimento, fazendo uma previsão até 2020, e é evidente que, no futuro os cimentos com adições irão adquirir uma importância crescente. A força motriz por trás dessa tendência é a necessidade cada vez maior de reduzir as emissões de CO₂, como será explicado.

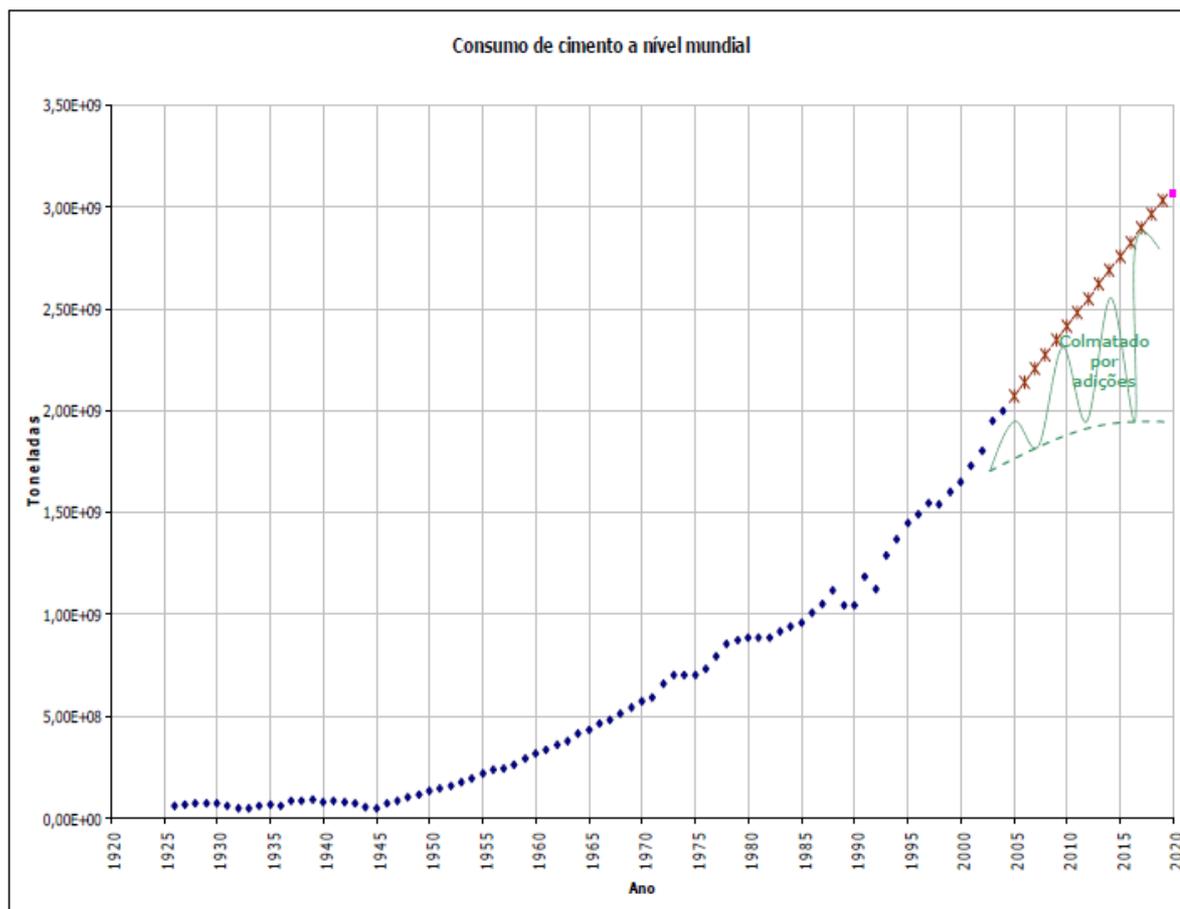


Figura 1.1 – Consumo de cimento a nível mundial e utilização esperada de adições para colmatar as necessidades previstas de ligante (com base nos dados da *US Geological Survey* e da *Palladian Publications Limited - World Cement*, adaptado de Sousa, 2010).

O cimento Portland artificial é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário ou cré (carbonato de cálcio), argila ou xisto argiloso (silicatos de alumínio e ferro) ou a partir de margas ou calcários margosos (margas - mistura de materiais calcários e argilosos) e, eventualmente, outra ou outras substâncias apropriadas ricas em sílica, alumina ou ferro, reduzida a pó muito fino, que se sujeita à acção de temperaturas da 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). Àquelas temperaturas as matérias-primas reagem entre si, no que são ajudadas pela fase líquida obtida pela fusão de cerca de 20% da matéria-prima (cliquerização), originando novos compostos. Em virtude destes fenómenos químicos e físicos, os produtos da reacção, ao arrefecerem, aglomeram-se em pedaços com dimensões variáveis mas geralmente entre 2 mm e 20 mm, chamados clínquer. Os duros nódulos de clínquer são depois arrefecidos e moídos simultaneamente com uma pequena percentagem de gesso até se obter uma granulometria muito fina (Coutinho, 2002).

O cimento Portland é assim composto principalmente por nódulos de clínquer finamente moído, sendo este, composto predominantemente por minerais hidraulicamente activos de silicatos de cálcio formados através da queima a alta temperatura de calcário e de outros materiais num forno. Este processo normalmente exige cerca 3,2-6,3 GJ de energia e 1,7 toneladas (t) de matérias-primas

(principalmente calcário) por tonelada de clínquer e é acompanhada por emissões atmosféricas significativas, em especial, dióxido de carbono (CO_2), mas também os óxidos de nitrogénio, óxidos de enxofre e partículas. O nível global de emissões de CO_2 é de cerca de 1t/t de clínquer, fazendo assim da indústria de cimento, uma das principais fontes de produção deste gás de efeito estufa (Habert et al., 2010).

A indústria cimenteira produz, actualmente, cerca de 5 % das emissões de CO_2 a nível global. As emissões de dióxido de carbono no processo de produção do cimento vêm directamente da queima de combustíveis fósseis, e da calcinação do calcário, cerca de 40% para cada uma destas etapas. Uma fonte indirecta e significativamente menor de CO_2 é a utilização de energia eléctrica e transportes (10% das emissões), mas admitindo que a electricidade é gerada a partir de combustíveis fósseis, cerca de metade do CO_2 emitido provém da combustão do combustível e a outra metade tem origem na transformação da matéria-prima (Relatório de sustentabilidade 2008, CIMPOR). Na Figura 1.2 representa-se o processo simplificado do fabrico de cimento e respectivas emissões de CO_2 de cada etapa (Habert et al., 2010).

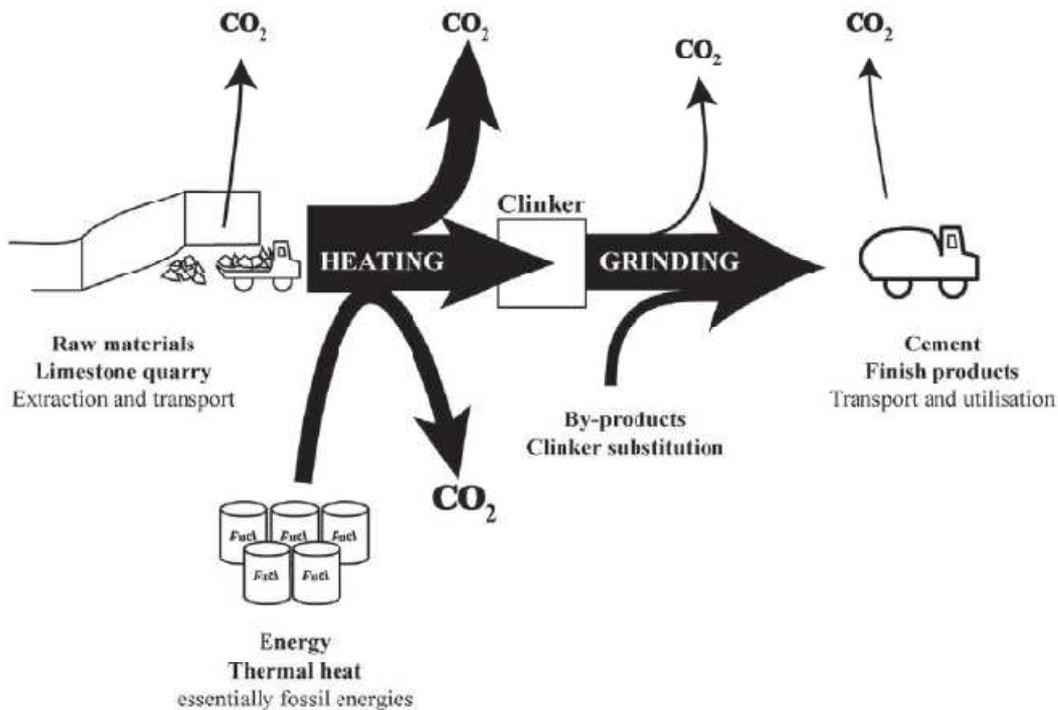


Figura 1.2 – Processo simplificado do fabrico de cimento e respectivas emissões de CO_2 de cada etapa. A espessura das setas é proporcional à quantidade de CO_2 libertada (Habert et al., 2010).

A enorme demanda por cimento, e a energia e grandes necessidades de matéria-prima necessárias à para a sua produção permitem à indústria de cimento consumir uma ampla variedade de resíduos de matérias-primas e dos combustíveis a fornecer para a sua indústria com oportunidades significativas de serem utilizadas grandes quantidades de subprodutos de outras indústrias.

A redução das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento pode ser conseguida (Relatório de sustentabilidade da CIMPOR, 2008):

- Reduzindo a quantidade de clínquer no fabrico de cimento (substituindo-se parte do clínquer por outros materiais reactivos adequados)
- Aumentando a eficiência energética do processo de produção de clínquer (que se prende quase exclusivamente com a tecnologia da linha de produção).
- Aumentando a percentagem de energia proveniente de combustíveis alternativos (por substituição dos combustíveis fósseis não-renováveis por combustíveis alternativos, provenientes de resíduos ou subprodutos industriais ou urbanos, como por exemplo o uso de pneus).
- Substituindo combustíveis com factores de emissão de CO₂ elevados, por outros com factores de emissão mais reduzidos (utilizando por exemplo pneus triturados ou coque de petróleo em detrimento do carvão).

Para além do CO₂, a produção de cimento é responsável pela emissão para a atmosfera de um conjunto de outras substâncias poluentes tais como partículas, compostos de azoto (NO_x) e compostos de enxofre (SO_x) (designados por poluentes principais) e, em muito menor escala, por um outro conjunto de substâncias (designados por micro-poluentes), tais como metais, dioxinas e furanos (PCDD/F) e compostos orgânicos voláteis (COV's).

No processo de produção de cimento, as emissões de compostos de azoto têm a sua principal origem na combinação do azoto atmosférico com o oxigénio do ar de combustão, às temperaturas elevadas que se verificam nos fornos (designado por “NO_x térmico”).

As emissões de partículas em fábricas de cimento têm vindo a decrescer nos últimos anos devido à instalação de sistemas de despoeiramento de tecnologia muito recente, nomeadamente filtros de mangas, em muitos dos fornos e respectivos arrefecedores.

As emissões de SO₂ têm a sua principal origem na volatilização do enxofre presente nas matérias-primas e, em menor parte, no enxofre presente nos combustíveis.

A presença de metais nas emissões de fornos de cimento tem a sua origem nas matérias-primas e nos combustíveis utilizados no processo. O teor de metais nestes inputs do sistema é bastante variável, embora sempre com níveis muito baixos. O comportamento dos metais no forno depende fundamentalmente da sua volatilidade. A indústria cimenteira não constitui uma fonte significativa destes compostos, mas pequenas quantidades podem ser emitidas devido ao teor de compostos orgânicos nas matérias-primas.

O teor de COV's nos gases de exaustão do forno varia tipicamente entre 10 e 100 mg/Nm₃ e na maior parte dos países a legislação em vigor não exige a medição de COV's a não ser quando são utilizadas matérias-primas ou combustíveis alternativos (Relatório de Sustentabilidade 2008, CIMPOR).

1.3 USO DE RESÍDUOS NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Conceptualmente, o cimento está a evoluir de um material com base em recursos não renováveis, para um material de valor acrescentado, ou seja, um material que acrescenta um benefício para os resíduos de materiais de baixo valor imediato que geralmente são de interesse ambiental. Esta evolução conceptual tem sido observada por outros autores, como *Aitcin* que sugeriu que, com necessidades de desenvolvimento sócio-económico e ambiental, a indústria do cimento vai passar longe de ser exclusivamente de clínquer Portland, para ser mais uma indústria de um ligante hidráulico em geral.

Assim, o cimento será personalizado para aplicações específicas e o processo concebido de forma a minimizar o desperdício e as emissões de gases com efeito de estufa. A Figura 1.3 fornece uma ilustração de materiais que podem ser reciclados no cimento e betão.

Como uma boa parte dos impactos ambientais referentes ao betão estão associados à produção de cimento Portland, reduzindo a quantidade de cimento na mistura a pode ser o passo mais importante para alcançar um betão "verde".

As reduções no uso de cimento são mais facilmente alcançadas através da substituição de outros materiais pozolânicos ou hidráulicos de cimento Portland. Em 2000, a Associação de Cimento Portland estimou que os materiais cimentícios suplementares, mais conhecidas por adições, substitutos parciais ou complementares de cimento Portland, sejam usados em 60% dos betões (Materials for Sustainable Sites. *A Complete Guide to the Evaluation Selection and Use of Sustainable Construction Materials*. Copyrighted Materials, 2009).

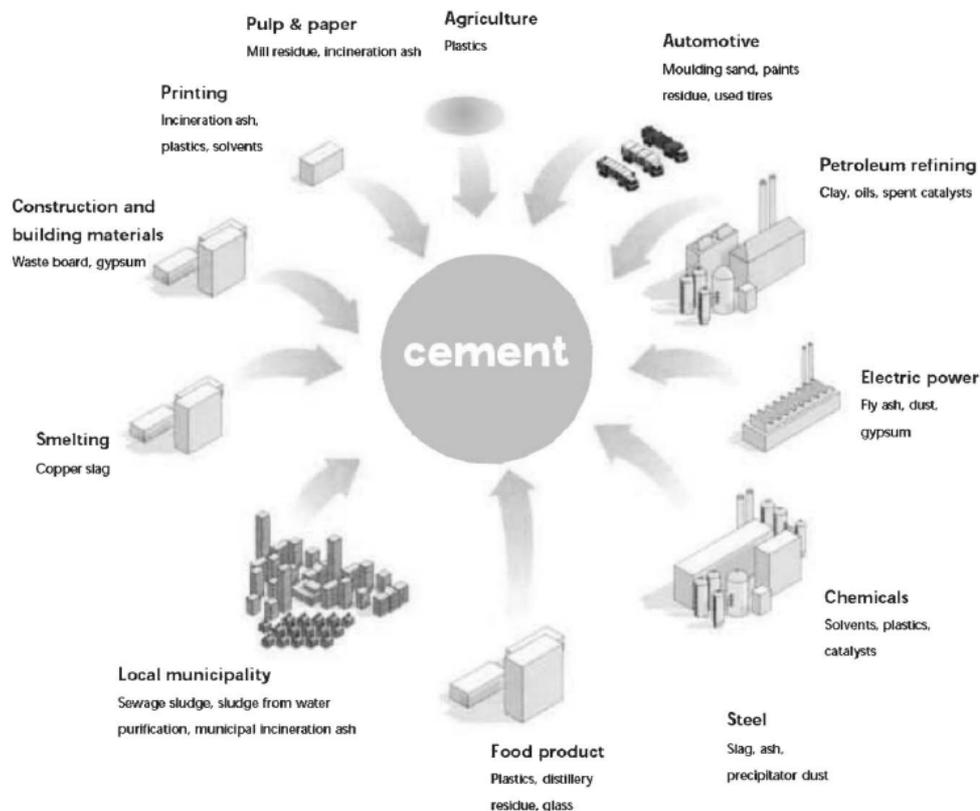


Figura 1.3 - Diagrama de materiais que podem ser reciclados em betão (World Council for Sustainable Business Development, *The cement sustainability initiative: Our agenda for action*).

Existe uma necessidade concreta para economizar matérias-primas e melhorar a durabilidade das estruturas de betão contribuindo para a sustentabilidade do betão como material de construção.

A maioria dos casos de deterioração do betão (isto é, falta de durabilidade) está relacionada com a corrosão das armaduras devido à despassivação provocada por ataque por cloretos ou carbonatação, (Papadakis, 2000) como se pode constatar na Figura 1.4. De facto as patologias prematuras em estruturas de betão armado ou pré-esforçado são causadas por elevada permeabilidade de betão

demasiado poroso, protegendo-o de forma insuficiente e subavaliação de actividade corrosiva do ambiente (Petranek, 2006), isto é por falta de durabilidade que poderá ser mitigada se forem utilizadas adições pozolânicas, reconhecendo-se que se pode conseguir um desenvolvimento sustentado das indústrias do cimento e betão recorrendo a subprodutos com características cimentícias ou pozolânicas (Papadakis, 2000).

Além disso, nas últimas 4 ou 5 décadas a composição do cimento Portland foi alterada de uma relação C_3S/C_2S (silicato tricálcico/silicato bicálcico) de 1,2 para 3,0. Enquanto isto resultou em resistências mais elevadas em idades precoces, foi acompanhada maior calor de hidratação mais elevado e menor desenvolvimento da resistência após 28 dias. Os benefícios desta combinação para a durabilidade são, portanto, cada vez mais questionáveis (Phair, 2006).

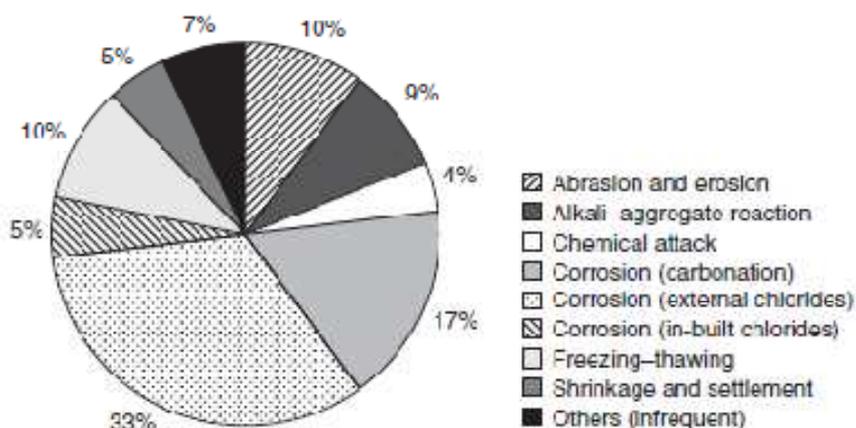


Figura 1.4 - Factores responsáveis pela deterioração de estruturas de betão armado (ICE Manual of Construction Materials, Volume I).

A presença de materiais de substituição adequados (adições) no cimento é conhecida por contribuir significativamente para a durabilidade e muitas vezes em termos de trabalhabilidade. A utilização de subprodutos é “amigo do ambiente” e uma forma de eliminar grandes quantidades de materiais que de outra forma poluiriam o planeta, água e o ar (Mehta, 1994).

O uso correcto de adições tem portanto vantagens em termos económicos e técnicos, melhorando as propriedades do betão fresco e endurecido tais como:

- Melhoria da trabalhabilidade;
- Facilidade de bombagem;
- Redução de segregação;
- Redução da exsudação;
- Redução da retracção plástica;
- Redução da fissuração térmica por controlo do calor de hidratação;
- Significativa redução da permeabilidade.

Além destas vantagens, a substituição parcial do cimento Portland por adições acarreta um menor gasto de energia uma vez que a sua preparação consome muito menos (ou nenhuma, no caso de um

1.4 OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS

O presente relatório de projecto está organizado em cinco capítulos.

No Capítulo 1 (Introdução) faz-se o enquadramento do tema do projecto, tecendo-se considerações sobre a utilização de resíduos pela indústria do betão e a sustentabilidade na construção.

No Capítulo 2 (Estado da Arte) apresentam-se as bases de conhecimento com que se partiu para a realização deste trabalho referente ao pó de vidro (GP). São também referidos alguns elementos nocivos ao betão e os respectivos ensaios e resultados desses ensaios referentes ao GP.

No Capítulo 3 (Programa Experimental) é feita a caracterização dos materiais utilizados assim como a apresentação das metodologias e dos ensaios praticados para as diferentes argamassas em estudo, assim como os resultados obtidos.

O Capítulo 4 (Análise e Discussão de resultados) avalia o desempenho do material testado com base no resultado dos ensaios, sua interpretação e desempenho face ao material de controlo.

O Capítulo 5 corresponde às Conclusões e Desenvolvimentos Futuros onde se faz uma comparação geral de todos os resultados face a parâmetros de durabilidade e de resistência mecânica, validação dos mesmos comparando com outros estudos já realizados e referem-se sugestões para futuros desenvolvimentos do tema abordado.

1.5 BIBLIOGRAFIA

A UE e a Gestão dos Resíduos. Comissão Europeia Direcção-geral do Ambiente. Luxemburgo, Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias, 2000.

Chandra, Satish. *Use of waste materials in concrete manufacturing*. William Andrew Publishing Noyes, 1993.

Cimpor. 2º Relatório de Sustentabilidade – Actividade Económica, Ambiental e Social. Extraído do site www.cimpor.pt

Comissão Europeia do Ambiente - <http://ec.europa.eu>

Coutinho, Joana de Sousa. *Materiais de Construção 2 - 1ª PARTE – LIGANTES E CALDAS*. FEUP, Porto, 2002, actualizado em 2010.

David P. Angel, Trina Hamilton., Matthew T. Huber. *Global Environmental Standards for Industry* Annu. Rev. Environ. Resour, 2007, pp 32:295–316.

EcoSmart Foundation. EcoSmart Concrete. http://www.ecosmartconcrete.com/enviro_cement.cfm (accessed June 7, 2007).

Ellis Gartner. *Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements*. Cement and Concrete Research 34, 2004, pp 1489–1498.

Ernst Worrell, Lynn Price, Nathan Martin, Chris Hendriks, Leticia Ozawa Meida. *Carbon dioxide emissions from the global cement industry*. Annu. Rev. Energy Environ, 2001, 26:303-29.

Europe's environment: The Dobris Assessment - An overview. Comissão Europeia do Ambiente, 1995.

Flickinger, Michael C.; Drew, Stephen W.. *Encyclopedia of Bioprocess Technology - Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation, Volumes 1-5*. John Wiley & Sons, 1999.

G. Habert, C. Billard, P. Rossi, C. Chen, N. Roussel. *Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives*. Cement and Concrete Research 40, 2010, pp 820–826.

Gurmendi, Alfredo C.. *The Mineral Industry of Portugal*. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey April 2010.

Hendrik G. van Oss and Amy C. Padovani. *Cement Manufacture and the Environment Part II: Environmental Challenges and Opportunities*. Journal of Industrial Ecology, Copyright 2003 by the Massachusetts Institute of Technology and Yale University, Volume 7, Number 1.

ICE Manual of Construction Materials. Institution of Civil Engineers, 2009.

Joana Sousa Coutinho. *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*. Dissertação para doutoramento, 392 pp. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 24 Julho, 1998. (publicado em livro em 2005).

Lisa J. Hanle. *CO₂ Emissions Profile of the U.S. Cement Industry*. U.S. Environmental Protection Agency, Pennsylvan, Kamala R. Jayaraman and Joshua S. Smith ICF Consulting.

Malhotra, V. M.. *Role of Supplementary Cementing Materials in Reducing Greenhouse Gas Emissions into the Environment*. [s.l.]: [OP & J], [1998].

Materials for Sustainable Sites. A Complete Guide to the Evaluation Selection and Use of Sustainable Construction Materials. Copyrighted Materials, 2009.

Mehta, P. K. 2002. *Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development*. Concrete International, Vol. 24, No. 7, July 2002, pp. 23–28.

Papadakis, V (2000). *Efficiency Factors (K-values) for supplementary cement materials regarding carbonation and chloride penetration*. CANMET/ACI, International Conference on Durability of Concrete, vol.1, pp. 173-187 Ed. By V.M. Malhotra, Barcelona, Spain.

Pereira, Fabiano Raupp. *Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas*. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

Petranek, V. (2006) *Special Protective Coatings for Concrete Structures*. Fédération Internationale du Béton. Paper in Proceedings of the 2nd International Congress. ID 15-43 Session 15 – Durability of concrete structures, – Naples, Italy

Phair, Jonh W.. *Green chemistry for sustainable cement production and use*. Tutorial Review Green Chemistry, Julho, 2006.

R. Rehan., M. Nehdi. *Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry* Environmental Science & Policy 8, 2005, pp 105–114.

Sousa, Susana Patrícia Bastos. *Betão eco-eficiente com cinza de casca de arroz*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.

World Council for Sustainable Business Development. *The cement sustainability initiative: Our agenda for action*, <http://www.wbcscement.org/pdf/agenda.pdf>.

Worrell, Ernest. *Cement and Energy*. Lawrence Berkeley, National Laboratory Berkeley, California, United States.

2

ESTADO DA ARTE DO PÓ DE VIDRO

2.1. VIDRO

2.1.1. O VIDRO EM PORTUGAL

A produção de vidro em Portugal tem já uma longa história, com uma duração de cerca de meio milénio. Com efeito, esta actividade encontra-se devidamente documentada desde, pelo menos, os anos 1520, sendo actualmente um dos sectores industriais mais dinâmicos e actualizados (*Mendes, 2000*).

Após uma certa dispersão dos fornos de vidro por diversos pontos do país, nos séculos XVII e XVIII e nos primeiros três quartéis do século XIX, a indústria vidreira começou a concentrar-se, sobretudo, na localidade da Marinha Grande, pertencente ao concelho e distrito de Leiria (*Mendes, 2000*).

Durante o século XIX, mais precisamente, entre 1864 e 1888 a indústria do vidro sofreu um avanço tecnológico bastante apreciável. Superando as dificuldades de transporte, a região envolvente oferecia os elementos fundamentais para a produção de vidro: areias siliciosas especiais (matérias-primas essenciais) e lenha (combustível conveniente). Na área da Marinha Grande as principais matérias-primas necessárias para produção de vidro, ocorrem em quantidade e qualidade (*Mendes, 2000*).

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. De qualquer modo, foi então que aquela se transformou no principal pólo de produção de vidro no país, tendo o número de unidades vidreiras subido de 1, em 1888, para 14, em 1922. Como nesta última data existiam, em Portugal, 36 fábricas de vidro (das diversas modalidades), as 14, instaladas na Marinha Grande, correspondiam a cerca 38,8% do total. As restantes fábricas vidreiras encontravam-se dispersas pelo país, sobretudo no Centro, entre as cidades de Lisboa e do Porto (*Mendes, 2000*).

No período que decorreu entre os anos 1930 e 1960, a indústria vidreira, em Portugal, prosseguiu o seu caminho no sentido do desenvolvimento e da modernização (*Mendes, 2000*).

O aumento da capacidade produtiva do sector vidreiro, por um lado, e a perda do mercado colonial, no pós 25 de Abril de 1974, por outro, induziu os industriais vidreiros a dirigirem-se mais para o estrangeiro, embora na sequência de algumas iniciativas já tomadas anteriormente. Com efeito, dos finais dos anos 1950 até aos inícios da década de 1970 (última fase dos já chamado “30 anos de ouro da economia”), alguns empresários vidreiros portugueses, beneficiando do know-how entretanto adquirido, começaram a ser atraídos pelo mercado externo, inclusive através da instalação, noutros países, de fábricas de vidros (*Mendes, 2000*).

As exportações de vidro têm vindo a aumentar substancialmente, nas suas diversas modalidades. No que concerne ao vidro plano, as suas numerosas aplicações e a inovação, em termos de produto, tem permitido exportar uma parte considerável da produção. Quanto ao vidro de embalagem, o elevado grau de modernização das cinco unidades, instaladas no país, usando a tecnologia mais avançada, tem permitido aumentar as exportações (Mendes, 2000).

A produção de vidro tem aumentado em Portugal, como se pode observar na Figura 2.1, segundo o Instituto do Ambiente, sofrendo nos últimos anos uma estagnação, devido sobretudo à crise nacional.

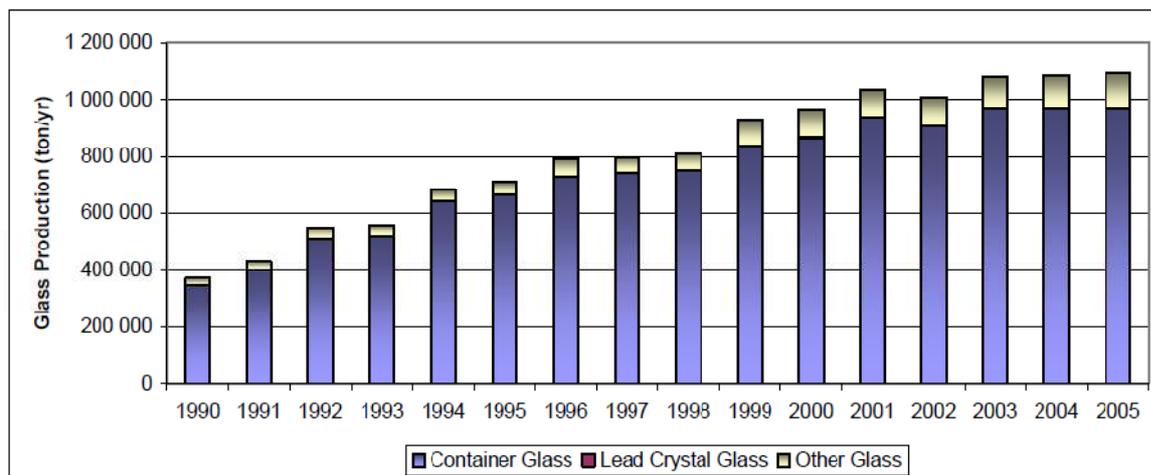


Figura 2.1 - Produção de vidro em Portugal por tipo de vidro, excepto vidro em placa (Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, Instituto do Ambiente, 2007).

2.1.2. O MATERIAL VIDRO

American Society for Testing and Materials (ASTM), define o vidro como um produto inorgânico de fusão que foi arrefecido numa condição rígida sem cristalizar. A ASTM afirma ainda que o vidro é geralmente duro e quebradiço e tem uma fractura concoidal. O vidro pode ser incolor ou colorido. É transparente, mas pode ser opaco ou translúcido e apresenta uma estrutura não cristalina, isto é, a sua estrutura é amorfa.

O vidro é o resultado da fusão de diversas matérias-primas inorgânicas minerais, as quais após serem submetidas a um processo de arrefecimento controlado, transformam-se num material rígido, homogéneo, estável, inerte, amorfo e isotrópico. A sua principal característica é ser moldável a uma determinada temperatura, sem qualquer tipo de degradação (Ortiz, 1996).

As matérias-primas normalmente utilizadas na produção do vidro sodo-cálcico são a areia, o calcário, a dolomite, o feldspato, o cianeto nefelínico (óxido de arsénio para auxiliar a libertação de CO₂ a CO proveniente de carbonatos de cálcio e sódio), a alumina calcinada, hidróxido de cálcio, os afinantes, corantes ou descorantes e vidro reciclado. A percentagem de casco usada, varia consoante o fabricante. Normalmente usa-se entre 25 e 30%, mas em geral, existe tendência para aumentar, sendo objectivo de muitos fabricantes atingir os 50% (Lund, 1993). Adiciona-se também óxido de manganês (MnO₂) para limpar o vidro, por exemplo, se a matéria-prima conte ferro, reflecte-se uma cor esverdeada no vidro, que se não for pretendida é limpa com o MnO₂ (Mata, 1998).

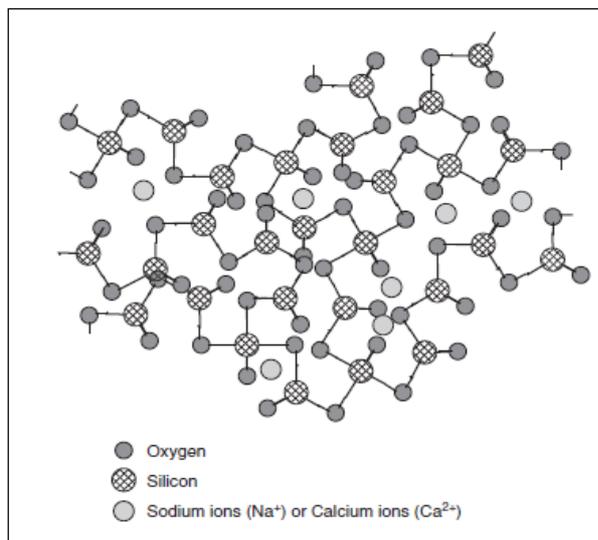


Figura 2.2 - Estrutura do vidro (*Manual of Construction Materials, Volume II*).

A variação da composição resulta numa enorme variedade de tipos de vidro, famílias ou grupos, e uma variedade de propriedades correspondentes. As propriedades do vidro dependem sempre da sua composição, permitindo assim um design de um conjunto de propriedades para atender a uma aplicação específica.

Há uma variedade de usos do vidro. 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 de 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 esterilizada com qualquer processo adequado. O vidro, quando apresenta determinada coloração também protege da luz. Nos primórdios da sua utilização, o vidro tinha função ornamental, mas actualmente o uso mais frequente é como embalagem (bebidas, fármacos, etc.) (*Shelby, 1997*).

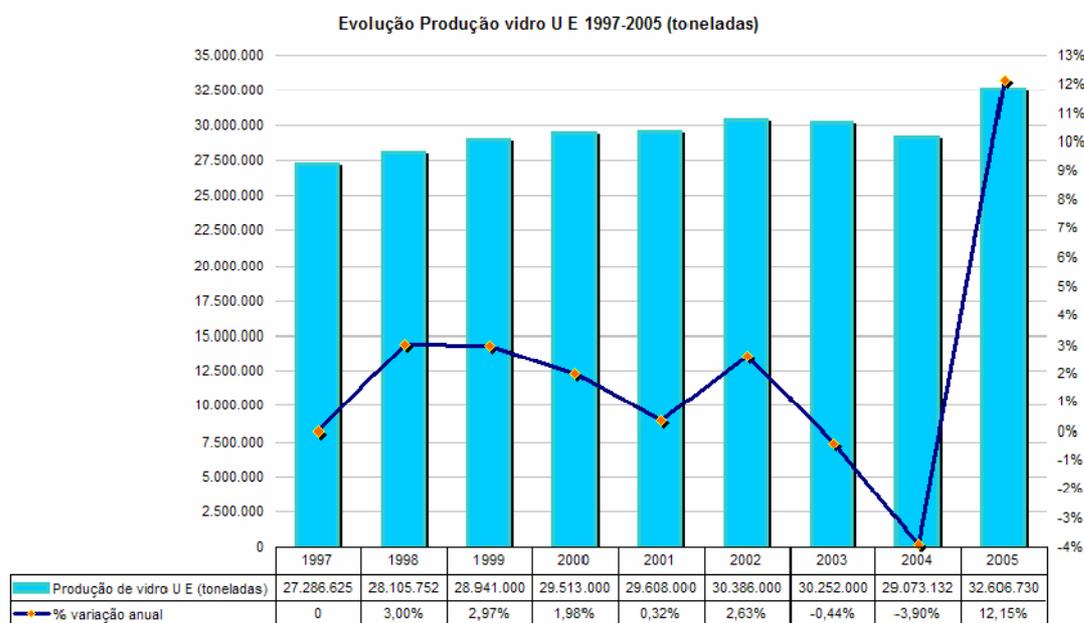
O vidro de embalagem (garrações, garrafas, frascos, boiões, rolhas e tampas, ampolas e outros recipientes de vidro para transporte ou embalagem), sendo o maior segmento da indústria europeia e a U E o maior produtor mundial tem como características a preservação das qualidades técnicas dos produtos a proteger e como destinatárias as actividades química, perfumaria, farmacêutica e vidro técnico para laboratórios químicos, sendo as principais as de produção alimentares e bebidas (*IAPMEI, 2007*).

O vidro plano, sendo o 2º maior segmento vidreiro europeu, onde estão abrangidos os vidros: lisos e impressos, aramados ou não, coloridos ou incolores; de segurança, temperado ou laminado; espelhos de vidro; isolantes; biselados ou trabalhados. As suas aplicações destinam-se a janelas, portas, clarabóias, divisórias, mobiliário, protectores de vento para piscinas, estufas hortofrutícolas e para floricultura, funcionando como barreira visando a insonorização, a protecção contra os ventos e as temperaturas e a conservação de energia e tem tido uma procura crescente nas últimas 2 décadas pelas actividades de construção de edifícios (cerca de 80%) e automóvel (< 20%) (*IAPMEI, 2007*).

O vidro especial ocupando o 3º lugar vidreiro europeu inclui a iluminação, tubos para televisão e vidros especializados para fins ópticos, médicos e científicos. Tem como principais destinatárias as actividades de produção de aparelhagem de televisão, maquinaria para diversas indústrias, equipamentos eléctricos, iluminação, fotografia, cinematografia, comunicações, informáticos, electrónicos, defesa, investigação e desenvolvimento laboratorial nas áreas científicas, médica,

farmacêutica, oftalmológica, hospitalar e clínica, química, relojoaria, ourivesaria e bijutaria, energia, aeronáutica, espacial, marítima e pesqueira, construções especiais e electrodomésticos e instrumentos domésticos resistentes a elevadas temperaturas (IAPMEI, 2007).

O vidro doméstico no 4º lugar do total vidreiro europeu inclui a louça doméstica e os vidros de oferta, abrangendo os de cristal.



Fonte: dados trabalhados com base elementos CPIV - Comité Permanent des Industries du Verre

Figura 2.3 – Evolução da Produção de vidro na União Europeia entre 1997 e 2005 (IAPMEI, 2007).

Com base nas principais composições, os vidros podem ser classificados nas seguintes categorias principais: a sílica vítrea, vidro de silicatos alcalinos, vidros de sodo-cálcico, vidros boro-silicatos, vidros de chumbo, vidros de bário e vidros alumino-silicatados. A composição principal destes tipos de vidro é a mesma no entanto pequenas quantidades de aditivos são frequentemente adicionadas durante a sua produção para lhes dar cores diferentes ou para melhorar propriedades específicas. Os vidros sodo-cálcicos são largamente utilizados para produzir recipientes. Os resíduos de vidro são maioritariamente do tipo sodo-cálcico (80% em peso). Em termos de cor, 63% são claros, 25% são laranja, 10% são de cor verde e 2% são azuis ou de outras cores (Shi & Zheng, 2007).

As composições típicas de diferentes tipos para diferentes aplicações são listadas na Tabela 2.1. Os vidros sodo-cálcicos, usados fundamentalmente para embalagem, são compostos por 66-75% de SiO₂, 12-17% de Na₂O e CaO 6-12%. (Shi & Zheng, 2007). Como se pode verificar, algumas características deste tipo de vidro não estão dentro dos limites regulamentares de pozolanas para betão (NP 4220). De facto, o sódio não é compatível com o betão devido à reacção álcali-sílica e por isso o teor de sódio equivalente é limitado, e deve ser bastante inferior ao que alguns tipos de vidro apresentam. Uma abordagem mais exaustiva acerca deste problema, que o uso de vidro como adição pode acarretar, será realizada mais adiante.

O segundo tipo importante é o vidro de chumbo, usada nomeadamente em tubos de néon, peças electrónicas, etc., no entanto, uma séria preocupação para a utilização deste tipo de vidro em cimento e betão é o alto teor de chumbo no vidro, que poderia ser potencialmente lixiviado pelo ambiente (Shi & Zheng, 2007).

Tabela 2.1 – Composição química de vidros comercializados (McLellan & Shand, 1984).

Classes and uses	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	PbO	Others
Soda-lime glasses										
Containers	66-75	0.7-7		12-16	0.1-3	0.1-5	6-12			
Float	73-74			13.5-15	0.2	3.6-3.8	8.7-8.9			
Sheet	71-73	0.5-1.5		12-15		1.5-3.5	8-10			
Light bulbs	73	1		17		4	5			
Tempered ovenware	75	1.5		14			9.5			
Borosilicate										
Chemical apparatus	81	2	13	4						
Pharmaceutical	72	6	11	7	1					
Tungsten sealing	74	1	15	4						
Lead glasses										
Color TV funnel	54	2		4	9				23	
Neon tubing	63	1		8	6				22	
Electronic parts	56	2		4	9				29	
Optical dense flint	32			1	2				65	
Barium glasses										
Color TV panel	65	2		7	9	2	2	2	2	10% SrO 9% ZrO
Optical dense barium crown	36	4	10						41	
Aluminosilicate glasses										
Combustion tubes	62	17	5	1		7	8			
Fiberglass	64.5	24.5		0.5		10.5				
Resistor substrates	57	16	4			7	10	6		

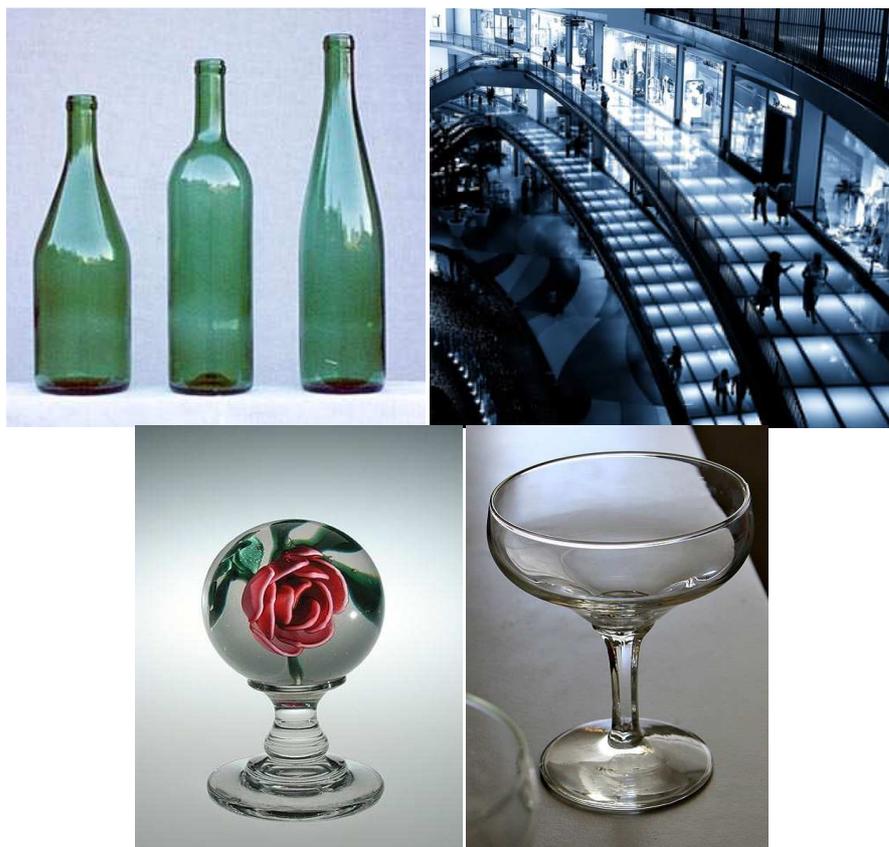


Figura 2.4 - Exemplos de aplicação do vidro (recipientes, vidro em placa, ornamentos).

2.1.3. RECICLAGEM DO VIDRO

À partida o vidro é um material reciclável e este facto contribui para a sustentabilidade. Na realidade o vidro é constituído sobretudo por silicatos, que são os materiais mais comuns existentes na terra (cerca de 2/3 da crosta terrestre). De facto a maioria das rochas são constituídas por silicatos. O fabrico de vidro consiste basicamente em fundir as matérias-primas e arrefecer enformando na forma pretendida, o que requer energia. O vidro envolve também as emissões de dióxido de carbono, a partir de descarbonização de calcário e de materiais carbonatados em condições de elevada temperatura (*Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases*, Instituto do Ambiente, 2007).

Tabela 2.2 - Emissões efectivas de CO₂ na produção de vidro (*Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases*, Instituto do Ambiente, 2007).

Material fabricado	Emissões efectivas (kg/ton)
Vidro em placa	126
Recipientes de vidro	130
Cristal de chumbo	239
Outros tipo de vidro	239

A incorporação de vidro reciclado nas matérias-primas naturais para a produção de novo vidro, tem adquirido grande importância, devido a questões ambientais e económicas. Do ponto de vista ambiental, a adição de casco (vidro para reciclagem) permite uma considerável redução de resíduos sólidos, provenientes de embalagens descartáveis principalmente. Por outro lado, promove a redução das dificuldades na extracção e utilização dos minerais que constituem as matérias-primas do vidro. Também é possível reduzir o consumo de combustíveis na geração de energia, minimizando os problemas de poluição ambiental (*Mata*, 1998).

No campo da gestão de resíduos, a indústria de embalagens de vidro demonstrou uma abordagem responsável, desde que tomou a iniciativa de lançar a recolha e reciclagem de embalagens de vidro usado, na década de 1970. Como resultado, hoje a maior parte dos recipientes de vidro usados não são enviados para a eliminação em aterros ou incineradoras após o uso, mas são um material de partida importante para a produção de novos recipientes de vidro. Este processo de reciclagem em ciclo fechado pode ser repetido indefinidamente, sem qualquer perda de qualidade técnica (*Instituto do Ambiente*).

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 objectivo de melhorar o seu desempenho (*Mata*, 1998).



Figura 2.5 - Ciclo de vida (infinito) do Vidro (<http://letsreciclar.wordpress.com>).

Para recolha do vidro de embalagem usado (casco) existe uma rede nacional de vidrões, explorada em colaboração com os órgãos centrais e as autarquias e está planeado um esquema de envio do casco recolhido nas unidades fabris do vidro de embalagem para reciclagem (Mata, 1998).

O principal objectivo das autoridades é reduzir, na medida do possível, a eliminação do vidro pós consumo em aterro e um desvio de produto economicamente viável (Mata, 1998).

Em Portugal o vidro já ultrapassa largamente essa taxa, ao atingir actualmente os 42%. Além disso, a reciclagem de vidro significa menor volume de lixos municipais, maior limpeza nos locais públicos e ao nível nacional, economia de energia e de matérias-primas (Mata, 1998).

A maioria dos processos de separação que se usam na Europa podem ser realizados como se evidencia na Figura 2.6 (Maltha, 1993).

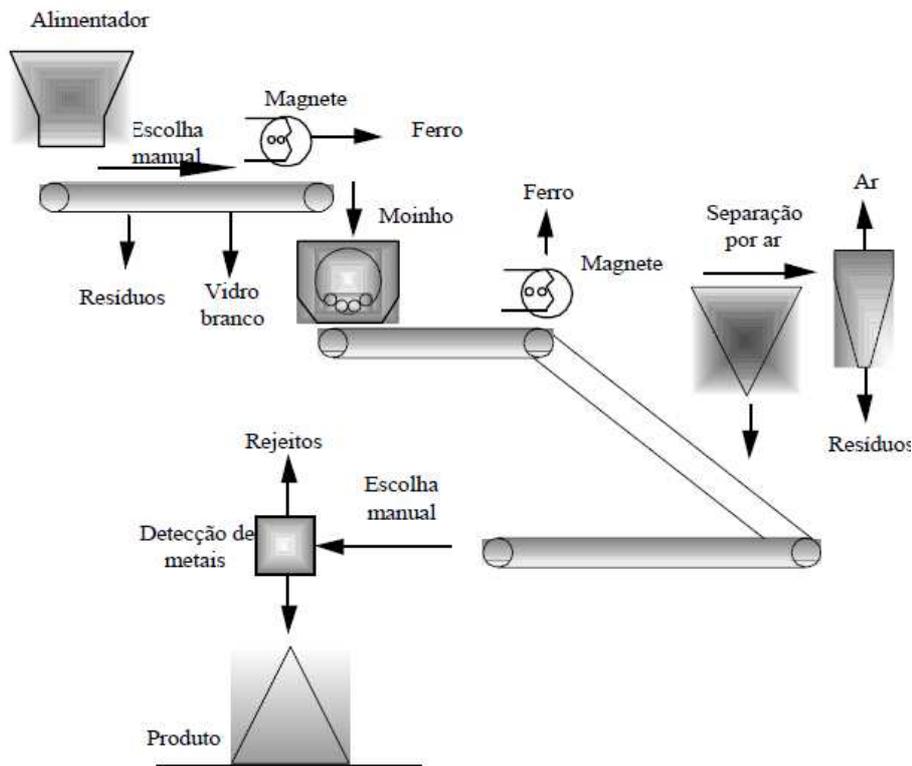


Figura 2.6 – Diagrama tipo duma estação de tratamento de casco de vidro (Maltha, 1993).

A maior parte do vidro é produzido na forma de recipientes, e a maior parte do que é colectado após consumido e é novamente utilizado para fazer recipientes. A eficiência deste processo depende do método de recolha e triagem de vidro de cores diferentes. Se o vidro de cor diferente (claro, verde e laranja) pode ser separado, então eles podem ser usados para no fabrico de recipientes de vidro de cor semelhante. Todavia, quando vidros com cores diferentes se associam, tornam-se impróprios para a utilização como embalagens e são então utilizados para outros efeitos ou enviados para aterro (Mata, 1998).

Quando os resíduos de vidro não são ou deixam de ser adequados para reciclagem com fim de formar novos produtos de vidro, o material, que é relativamente agregado, pode ser moído ou mesmo pulverizado e ser usado como um filler noutros materiais (Mata, 1998).

Reindl (1998) relatou o uso de casco de vidro em várias vertentes, tais como, na construção de estradas, pavimentação asfáltica, agregados de betão, construção de aplicações (azulejos, tijolos de vidro, painéis de parede, etc.), fibra de vidro para isolamento, fertilizantes agrícolas, paisagismo, louças, cimento hidráulico, entre outras aplicações.

2.3. VIDRO COMO MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO EM ARGAMASSAS E BETÕES

2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

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

As adições ou substitutos parciais do cimento tornaram-se uma parte integrante do betão de cimento Portland. O uso de adições é vantajoso pois melhora as propriedades mecânicas e de durabilidade do betão pelo seu benéfico impacto na microestrutura do material. As propriedades de cinzas volantes comuns e sílica de fumo, e os resultados dos betões incorporando esses resíduos encontram-se bem documentados. A variedade de outros resíduos ou materiais reciclados susceptíveis de serem usados como substitutos parciais de cimento estão disponíveis, e sua utilização em betão torna-se uma opção cada vez mais atraente, principalmente se questões ambientais estiverem em causa.

Um material pozolânico típico deve apresentar características essenciais: conter elevado conteúdo em sílica no estado amorfo, e ter uma elevada superfície específica. Constituído essencialmente por sílica (SiO_2 - cerca de 70%) no estado amorfo e uma menor percentagem de sódio (Na_2O) e cálcio (CaO), o vidro apresenta uma composição favorável ao desenvolvimento da reacção pozolânica. 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) (Shi *et al.*, 2002).

A investigação sobre o uso de vidro moído como substituto parcial para agregado data de muitas décadas. Os trabalhos de investigação sobre o uso de vidro moído em pó como material pozolânico começou por volta de 1970, mas a maioria dos trabalhos nesta área é relativamente recente, e tem sido incentivada como resultado de acumulação contínua de resíduos de vidro e suas conseqüentes questões ambientais (Shayan & Xu, 2006).

Os álcalis do cimento Portland e a sílica do vidro reagem na presença de humidade resultando uma reacção química denominada álcalis-sílica (ASR). Por esta razão, estudos com o uso de vidro em betão como parte do agregado grosso nem sempre tiveram bons resultados devido à redução da resistência e à expansão excessiva (Terro, 2006).

Vários estudos têm sido realizados com intuito de avaliar o uso de vidro, como uma substituição parcial de cimento e substituição parcial de agregados finos. A maioria dos estudos existentes recomenda a sua utilização apenas como pó fino. As partículas finas de vidro geralmente apresentam actividade pozolânica benéfica para o betão, enquanto partículas grossas são geralmente nocivas devido à ASR. Embora o uso de partículas finas seja uma solução eficaz para o uso de vidro como adição em betão, a moagem do vidro representa um custo significativo, uma vez que várias horas de tratamento são necessárias para obter uma finura eficiente de vidro (quase equivalente ao cimento) (Terro, 2006).

Recentemente, vários estudos têm investigado a propriedade pozolânica de pó de vidro e da utilização do vidro como um substituto do cimento em betão (Shao *et al.*, 2000; Dyer & Dhir, 2001; Shayan & Xu, 2004; Shi *et al.*, 2004, 2005; Shayan & Xu, 2006). As secções seguintes resumem os principais resultados de algumas pesquisas mais recentes.

2.3.2. REACÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (ASR)

2.3.2.1 Considerações gerais

Neste tipo de reacção o mecanismo de ataque recai sobre apenas algumas substâncias do betão, mais precisamente sobre os agregados, quando estes contêm sílica reactiva (Coutinho, 2002).

A solução que circula nos poros e fendas do betão é uma solução saturada em hidróxido de cálcio que contém sódio e potássio em quantidades variáveis e que podem reagir com determinados tipos de sílica (variedades criptocristalinas ou mesmo amorfas) que exista nos agregados. A reacção começa com um ataque à sílica não perfeitamente cristalizada pelos hidróxidos alcalinos da solução intersticial. Como resultado forma-se um gel de silicatos alcalinos quer em planos de debilidade ou nos poros do agregado onde existe sílica reactiva, ou então, à superfície das partículas de agregado. Neste último caso forma-se uma superfície alterada típica, que pode vir a destruir a aderência entre as partículas de agregado e a pasta de cimento envolvente. Este gel é expansivo pois permite a passagem para o seu interior de moléculas expansivas. À medida que o gel se vai formando resultam tensões internas cada vez mais elevadas, causando expansões, fissuração e rotura da pasta de cimento (Coutinho, 1998).

Atendendo a que a reacção entre os iões hidroxilo e a sílica reactiva é restringida à superfície do grão de agregado, o grau de expansão do betão será influenciado pela superfície específica do agregado e daí pela granulometria (Figura 2.7) e em menor extensão pela sua forma e textura (Hobbs, 1988). Assim sendo, quanto maior a relação superfície/volume, maior será a quantidade de sílica disponível para a reacção álcali-sílica (Foradaba, 2005). No caso da fracção areia, tem vindo a ser comprovado experimentalmente que a expansão do betão é tanto maior quanto menor o tamanho da partícula, até a um diâmetro aproximadamente de 75 μm , sendo que para valores inferiores a reacção desenvolve-se de forma mais dispersa e sem grandes expansões (Metha, 1986; Foradaba, 2005).

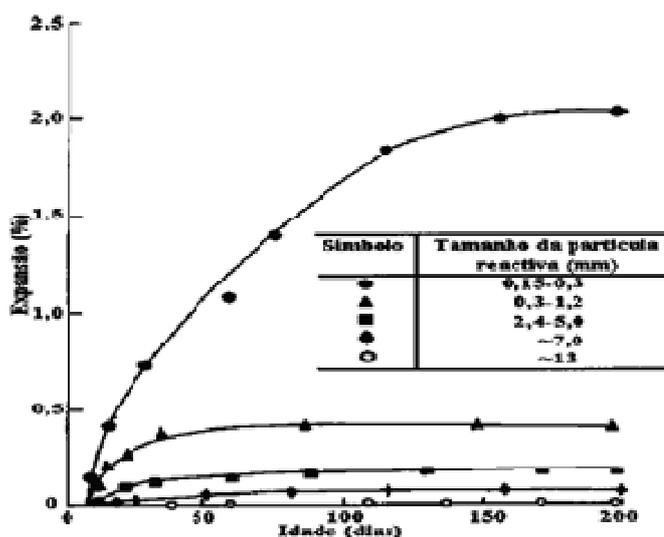


Figura 2.7 - Influência do tamanho da partícula reactiva na expansão por ASR (Hobbs, 1988).

A reacção álcali-sílica (ASR) é muito lenta e muitas vezes as consequências apenas se manifestam ao fim de muitos anos (Neville, 1995).

Os principais parâmetros que influenciam as expansões são (Coutinho, 1998):

- A reactividade dos agregados que está relacionada com a presença de sílica amorfa, parcialmente cristalizada ou variedades criptocristalinas;
- Quantidade de agregado reactivo e sua granulometria;
- Concentração na solução intersticial em álcali e cálcio (quantidade interna de substâncias agressivas);
- Tipo de cimento;
- Condições ambientais (quantidade externa de substâncias agressivas - por exemplo provenientes de sais descongelantes) e
- Quantidade de água disponível.

Os meios empregados para combater esta reacção são (Coutinho, 1998):

- Não utilizar agregados com sílica reactiva;
- Utilizar cimentos com teor de álcali, expresso em óxido de sódio, inferior a 0,6% em relação a massa do cimento, utilizar pozolânas, escória granulada de alto-forno entre outras adições em quantidade e qualidade suficiente;
- Limitar, se possível, a quantidade de álcalis vindos do exterior (sais descongelantes por exemplo);
- Usar baixas razões água/ligante (betões mais compactos);
- Evitar humidade no betão, que é imprescindível para se dar a reacção.

De acordo com a NP EN 196-2, o teor em álcali (solúveis em ácido) é designado por equivalente em óxido de sódio, o qual é calculado pela equação 1.

$$\text{Equivalente em NaOH (\%)(Na}_2\text{Oeq)} = \text{Na}_2\text{O(\%)} + 0.658 \text{K}_2\text{O(\%)} \quad (2.1)$$

Chatterji, Diamond e Helmuth acreditam que a formação do gel silico alcalino ocorre apenas na presença de uma quantidade suficiente de iões cálcio no betão. Portanto, mesmo em betão com conteúdo elevado de álcali (Na₂Oeq), se o cimento ou qualquer outra pasta de cimentação que é utilizado no betão tem baixo teor de cálcio, a expansão ASR será atenuada. Este fenómeno pode ser explicado da seguinte maneira: a sílica reactiva no agregado simplesmente se dissolve na solução de hidróxido alcalino, e não estará disponível para formar qualquer gel silico alcalino. Isto é importante como referência à prevenção da expansão ASR pela inclusão de pozolânas de baixo teor de cálcio, para substituir o cimento no betão.



Figura 2.8 - Reacção álcali-silica reactiva. Estados de alteração (1 a 4) de quartzo-filoneano em gel (Silva, 1992).

O desempenho em serviço dum determinado agregado é considerado o método mais fidedigno para conhecer a reactividade aos álcalis dum determinado agregado para betão. Contudo, as informações de desempenho podem não ser conclusivas já que dependem dos factores anteriormente referidos. Em resultado disso os agregados são normalmente avaliados por métodos laboratoriais realizados sob condições controladas. A necessidade de obter, num curto espaço de tempo, informação acerca da reactividade do agregado, antes de ser utilizado numa determinada estrutura, obrigou à adopção de métodos acelerados e reproduzíveis (Silva *et al.*, 2008).

Actualmente existem diferentes métodos de ensaio, uns que necessitam de intervenção muito especializada, caso da análise petrográfica, e outros de âmbito mais geral, caso dos ensaios de expansão. Em Portugal, os métodos de ensaio mais recomendados para avaliação da reactividade aos álcalis dos agregados, além da análise petrográfica conforme a Especificação LNEC E 415, baseado na norma ASTM C 295, são os preconizados na Especificação LNEC E 461, e incluem o método acelerado da barra de argamassa ASTM C 1260 e método de prismas de betão RILEM AAR-3 e métodos acelerado de prismas de betão RILEM AAR-4. Na tabela seguinte apresenta-se um resumo das especificações de cada um destes métodos (Silva *et al.*, 2008).

Tabela 2.3 - Métodos de ensaio para avaliação da reactividade aos álcali de agregados para betão (Silva et al., 2008).

Metodos de Ensaio	Modo operatório	Tipos de amostra	Critério de classificação	Vantagens e Limitações
Análise Petrográfica (ASTM C 295, LNEC E 415, RILEM AAR-1)	Observação visual e ao microscópio petrografico, complementada com outros métodos, como difracção de Raios X, análise térmica diferencial, espectrofotometria e IV e MEV.	Fragmentos, superfície polida, ou lâmina delgada.	Baseado na identificação e no teor de minerais reactivos aos álcali.	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido; • A confiança da análise depende da experiencia do petrografo; • Dificuldade na identificação de alguns minerais reactivos; • Ausência de um valor recomendado como critério de classificação; • Recomendação da realização de ensaios complementares.
Ensaio de expansão acelerado da barra de argamassa (ASTM C 1260)	Fabrico de provetes de argamassa, que são depois conservados em solução de hidróxido de sódio 1N a 80° C durante 14 dias. Realização de medidas de expansão a idades definidas.	3 barras (prismas) de argamassa de dimensões 25 x 25 x 285 mm.	<ul style="list-style-type: none"> • Não reactivo se aos 14 dias a Exp. < 0.10%; • Potencialmente reactivo se aos 14 dias 0.10% < Exp. < 0.20%; • Reactivo se aos 14 dias Exp. > 20%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio rápido (16 dias); • Permite avaliar a eficácia de adições minerais; • Não detecta reactividade de agregados de reactividade lenta ou retardada; • Considerado um ensaio severo, tem tendência a classificar como reactivos agregados com bom desempenho em serviço.
Ensaio de expansão de prismas de betão (RILEM AAR-3)	Fabrico de provetes de betão com combinação de agregados a ensaiar e com um teor em álcali do betão de 5.5kg/m ³ , que depois são conservados com HR>95% e a 38° C durante 12 meses. Realização de medidas de expansão e idades definidas.	3 barras (prismas) de betão com dimensões 75 x 75 x 250 mm.	Reactivo se a 1 ano a Exp. > 0.05%	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio lento; • Vantagem de poder utilizar a composição de betão a empregar ; • Permite avaliar a eficácia das adições minerais; • O limite da expansão parece ser efectivo apenas para agregados da reactividade "normal"; para agregados de reactividade lenta o ensaio deverá ser alargado até atingir a zona de patamar na curva de expansão.
Ensaio de expansão acelerado de prismas de betão (RILEM AAR-4)	Idêntico ao RILEM AAR-3 apenas com a alteração da temperatura de ensaio ser de 60° C em vez dos 38° C do anterior.	3 barras (prismas) de betão com dimensões 75 x 75 x 250 mm.	Reactivo se às 20 semanas a Exp. > 0.03%	<ul style="list-style-type: none"> • Desvantagem do tempo de resposta • Vantagem de poder utilizar a composição de betão a empregar; • Permite avaliar a eficácia das adições minerais; • Resultados internacionais de ensaios interlaboratoriais sugerem que a expansão às 15 semanas pode dar uma previsão efectiva da reactividade do agregado. Os mesmos resultados indicam que parece ser efectivo para agregados considerados de reactividade lenta.

2.3.2.2 Reacção álcali-silica (ASR) e GP

A expansão e fissuração do betão contendo agregados de vidro já são conhecidas há décadas. Investigações com vidros sintéticos demonstraram que os vidros siliciosos de sódio e potássio foram muito expansivos, mesmo em argamassas feitas com cimento aluminosos e gesso com teor de álcali muito baixo (Figg, 1981).

A influência do tamanho das partículas de vidro na ASR foi estudada por Shayan & Xu (2004) em barras de argamassa contendo diferentes tamanhos de partículas de vidro, chegando à conclusão que apenas as partículas com maior dimensão causaram expansão, tal como estudos anteriores apontavam.

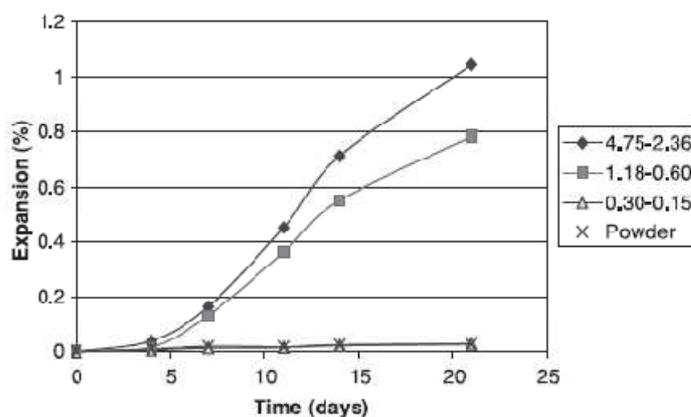


Figura 2.9 - Curvas de Expansão em barras de argamassa contendo partículas de vidro com diferentes granulometrias (Shayan & Xu, 2004).

Uma série de estudos anteriores já tinham avaliado o uso de resíduos de vidro em betão. A utilização de resíduos de vidro como uma substituição parcial de agregados (Park SB, Lee BC, Kim JH., 2004; Johnston CD., 1974; Topcu IB, Canbaz C., 2004., etc.), filler (Schwarz et al., Neithalath., 2007) ou a substituição parcial do cimento tem sido investigada, concluindo-se que, aumentando a quantidade de resíduos de vidro usados como agregado grosso, diminui as propriedades mecânicas dos betões, principalmente devido à interface fraca. Além disso, as partículas de vidro de maiores dimensões (mais de 1,2-1,5 mm) facultam a reacção álcali-silica (ASR). Assim, ao utilizar vidro moído ou pó de vidro com cimento, a granulometria não é, em princípio, propícia para originar ASR, mas o elevado teor de álcalis do vidro susceptibiliza preocupação (Schwarz et al., 2008).

A execução de trabalhos experimentais por Multon et al. (2009) mostrou que a expansão ASR foi sete vezes maior em partículas grossas (1,25-3,15 mm) relativamente as partículas menores (80-160 µm). A quantificação de sílica solúvel em álcalis, realizada para granulometrias diferentes, mostrou que todas as partículas continham quase a mesma quantidade de sílica reactiva. Portanto, esse factor não causou diferenças no comportamento expansivo das argamassas contendo as diferentes fracções de tamanho. Contudo apesar das inúmeras investigações, é difícil generalizar o efeito do tamanho das partículas reactivas dos agregados, uma vez que existem resultados conflituosos sobre o tamanho mais prejudicial que leva a uma expansão ASR maior. Alguns autores obtiveram expansões significativas para partículas muito pequenas (S. Diamond & N. Thaulow., 1974), enquanto outros obtiveram expansão insignificante quando os tamanhos das partículas reactivas tinham menos de 50 a 150 µm (Multon et al., 2009).

Taha & Nounu (2007) estudaram o uso de pó de vidro (dimensão inferior a 45µm) em betão no que diz respeito à reacção álcali-sílica. Analisaram dois níveis de substituição da areia de vidro reciclado substituindo areia natural, ou seja, 0% como controlo, 50% e 100%, e uma substituição única de 20% de GP como substituto de cimento. Segundo análises químicas efectuadas, o conteúdo de álcali foi bastante superior nos betões com GP.

O GP como material pozolânico amorfo, quando é usado como substituto de cimento em betão, pode contribuir para a formação dos produtos de hidratação e os silicatos de cálcio hidratados. Os resultados deste estudo mostraram que, quando GP foi usado como substituto parcial de cimento, a expansão ASR foi significativamente reduzida, mesmo com alto teor de álcali. As possíveis explicações para este fenómeno são discutidas de seguida (Taha & Nounu, 2007):

→ Pensa-se que, devido à contribuição do GP no processo de hidratação e nas reacções químicas, a concentração e natureza da solução existentes nos poros e os iões OH, sofreram alterações que levaram a atenuar a ASR;

→ A sílica reactiva presente no GP disponível como um material amorfo dissolve-se rapidamente durante a reacção pozolânica e reage com outras substâncias químicas para formar as fases minerais no betão. Portanto, a sílica reactiva dissolvida do GP é acomodada nos cristais de minerais do betão e deste modo não fica disponível para a ASR, que ocorre em fases posteriores. Concluiu-se que, com a presença de outras substâncias químicas a sílica reactiva dissolvida de GP não é capaz de formar gel ASR durante a reacção pozolânica. Por outro lado, se qualquer ASR pode ter ocorrido durante a etapa da reacção pozolânica, a expansão produzida seria exilada e acomodada com a plasticidade do betão ainda fresco.

→ Devido à menor quantidade cálcio no GP relativamente a quantidade no cimento Portland tipo I, a quantidade de portlandite (Ca(OH)_2) produzida no betão que contem GP é menor do que no betão que contem apenas cimento, dando origem a um betão menos alcalino e reduzindo assim o risco de ocorrer ASR;

→ No que se refere ao facto do conteúdo em álcali ser substancialmente maior no GP comparativamente ao cimento, mas a expansão ASR resultante no betão com presença de GP ter sido extremamente inferior, a explicação deste fenómeno reside no facto de que o consumo de álcalis na estrutura do gel de silicatos de cálcio hidratados durante a reacção pozolânica ocorre mais cedo do que a ASR, por isso, não existirá álcali para provocar ASR (ver Figura 2.10);

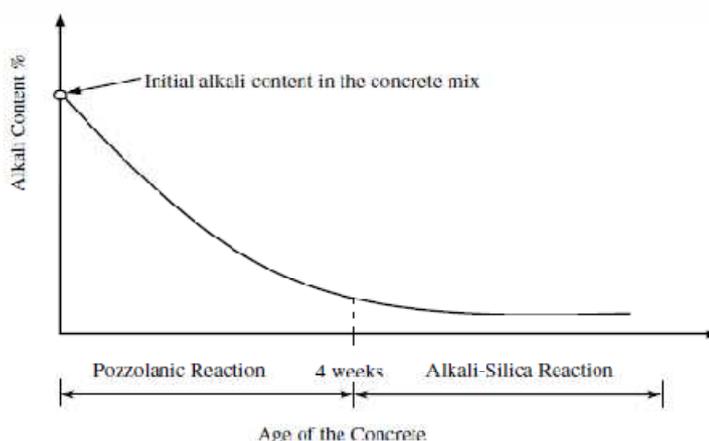


Figura 2.10 - Modelo do consumo dos álcalis na reacção pozolânica (Taha & Nounu, 2007).

O desenvolvimento da expansão provocada pela reacção álcali-silica (ASR) de diferentes tipos de vidro incorporados no betão como agregado fino, todos derivados do casco de vidro, mas com a composição química diferente, foi investigado por *Saccani & Bignozzi* (2009).

Como o vidro reciclado pode ter origem de várias fontes, por exemplo, separados dos resíduos urbanos, resíduos industriais, tubos de TV de raios catódicos (CRT), etc, é importante investigar se e como a composição do vidro influencia a ASR. Os diferentes tipos de vidro foram estudados com a finalidade de testar a reactividade ao álcali do betão, sendo a areia substituída por este num rácio de 10%, 25% e 35% pelos seguintes tipos de vidro:

- Vidro sodo-cálcico (doravante designado por SL) provenientes de fragmentos de vidro de recipientes de bebidas;
- Vidro incolor de silicato de boro (BS-U) e de vidro âmbar boro-silicato (BS- A) provenientes recipientes farmacêuticos;
- Vidro de chumbo-silicatado (CR), resultante da produção de utensílios de mesa, brindes e itens de decoração para casa em cristal.

A expansão foi medida em provetes 40x40x160mm fabricados de acordo com a NP EN 196-1. As amostras foram curadas durante 24 horas a 25°C e 100% HR, em seguida, submetidos à cura acelerada de 80 ° C em uma solução 1N de NaOH (Hidróxido de sódio). Este procedimento assemelha-se ao prescrito na norma ASTM C1260.

Para investigar o efeito da temperatura e concentração de álcali, noutros prismas de argamassa com 25% de substituição de areia por vidro foi adicionando directamente NaOH na água de amassadura, proporcionando assim um conteúdo $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ global de 2,5%. Estes provetes foram curados a 25° C e 38 ° C em 100% HR por 240 dias. Os ensaios de expansão para todas as amostras foram realizados simultaneamente em três diferentes câmaras de cura operando em 25° C, 38° C e 80° C, respectivamente. As curvas de expansão obtidas por estes autores encontram-se nas figuras seguintes.

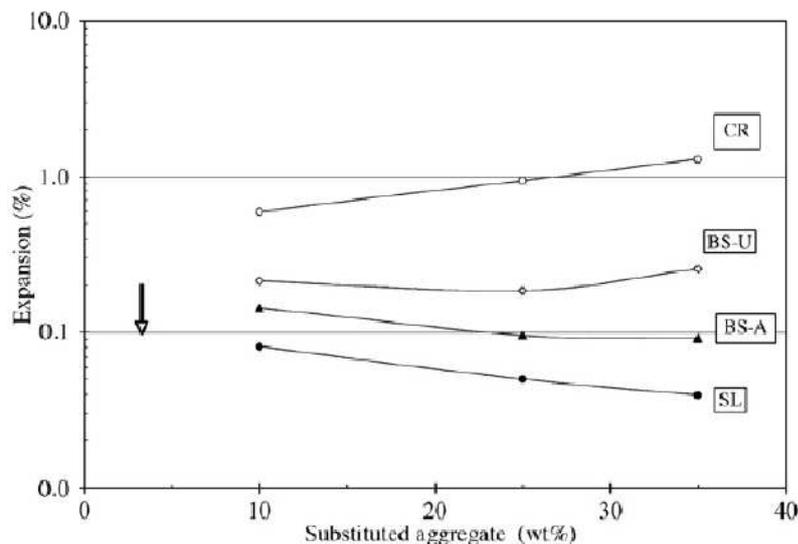


Figura 2.11 - Expansão ASR segundo o ensaio da barra de argamassa realizado de acordo com a ASTM 1260 (*Saccani & Bignozzi*, 2009)

Embora com semelhanças ao nível das propriedades químicas e físicas, as diferentes amostras de vidro exibiram uma resposta completamente diferente no que se refere à ASR. No vidro chumbo-silicatado, CR, em condições do ensaio da barra de argamassa (ASTM 1260), o efeito da ASR é nocivo (expansão superior a 0,20%, ou seja, agregado potencialmente reactivo), mesmo em baixo teor de substituição (10%), compreendendo uma expansão que aumenta à medida que aumenta a quantidade de areia substituída. No outro extremo, SL respeitou sempre os limites de segurança até um peso de 35% de substituição. No vidro boro-silicatado (BS), pequenas diferenças de composição são suficientes para transformar o comportamento de vidro de inofensivo para prejudicial. Quanto à possibilidade de reciclagem dessas tipologias de resíduos, a primeira conclusão que se pode tirar é que um estudo sistemático sobre os diferentes tipos de vidro deve ser realizado a fim de identificar as composições mais passíveis de originar expansão. Do ponto de vista científico, a atenção está centrada em explicar a origem dos comportamentos diferentes. A expansão não está directamente ligada ao teor de sílica no vidro utilizado como agregado: na verdade, SL tem o maior teor de SiO₂, mas apresenta uma menor expansão.

O estudo realizado por estes investigadores permitiu concluir que a composição química do vidro influencia fortemente o comportamento de expansão das amostras de argamassa contendo fragmentos de vidro como agregado. Os resíduos utilizados por estes autores continham diferentes teores em alcali equivalente, sendo o SL e o CR o mais e menos alcalino, respectivamente. O CR contém chumbo e os restantes não.

Recentemente foi realizado outro estudo por *Idir et al.*(2009), cujo objectivo incidiu na incorporação de resíduos de vidro cimento e/ou agregado fino, como substituição parcial, fazendo uma combinação de partículas de vidro finas e grossas, permitindo assim uma diminuição na energia de moagem necessária. Supõe-se que é possível tirar proveito da actividade benéfica das partículas mais pequenas para mitigar e/ou neutralizar o efeito prejudicial das de maiores dimensões. Como já tinha sido estudado anteriormente, as partículas de maior dimensão (substituição de areia) são mais susceptíveis de originar ASR em betão enquanto as partículas finas (substituição de cimento) têm uma actividade pozolânica benéfica para este.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI ^a
Glass	68.6	2.0	0.3	12.3	1.0	0.2	13.5	0.6	1.0
Cement	19.8	5.6	2.5	63.6	1.8	3.1	0.1	0.7	1.7
Glass classes	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Mean diameters of particles (µm)	3750	1875	940	473	238	120	11	11	8
Specific surface area ^b (m ² /kg)	1	2	5	11	18	35	182	389	538

^a LOI: loss on ignition.

^b C1-C5: calculated from the average diameter of particles.

Figura 2.12 - Composição química do vidro e do cimento (% por massa) e classes de finura das partículas de vidro (*Idir et al.*, 2009).

A primeira parte do estudo consistiu em avaliar a potencial expansão devido à ASR de todas as classes de tamanho das partículas de vidro. Assim sendo, 20% de areia não reactiva foi substituída em cada argamassa por cada uma das classes de vidro moído de finura equivalente (C0-C8). Os provetes são designados por Mi, onde i é a classe de vidro de acordo com a Figura 2.13.

Na segunda parte do estudo, foi testada a eficiência das partículas de vidro de menores dimensões na mitigação da ASR provocada pelas maiores (C0 e C1), usando três classes de partículas finas (C5, C6

e C8) como 20% e 40% de substituição de areia não reactiva. Por exemplo uma argamassa com a notação C1-20%C8 quer dizer que foi usado o agregado C1 com 20% de substituição parcial de 20% por finos da classe C8.

Os resultados referentes aos prismas com 20% de substituição de areia não reactiva de diferentes classes é dado na Figura 2.13. Como se pode verificar, o tamanho das partículas de vidro é o parâmetro que controla os valores da expansão. Nas condições em que foi realizado este ensaio, as partículas com dimensão inferior a cerca 1 mm não se apresentaram como prejudiciais para a ASR. No que se refere às consequências no comportamento mecânico, os resultados da resistência à compressão também são dados na Figura 2.13. Comparando com a argamassa de referência (100% cimento) diminui até 10 MPa ou mantém-se próxima do valor do controlo, quando as classes reactivas aos álcalis C0 e C1 são usadas, respectivamente. Por outro lado, quando são usadas partículas mais finas, C3-C8, sistematicamente ocorre um ganho de resistência que aumenta à medida que diminui a dimensão das partículas de vidro.

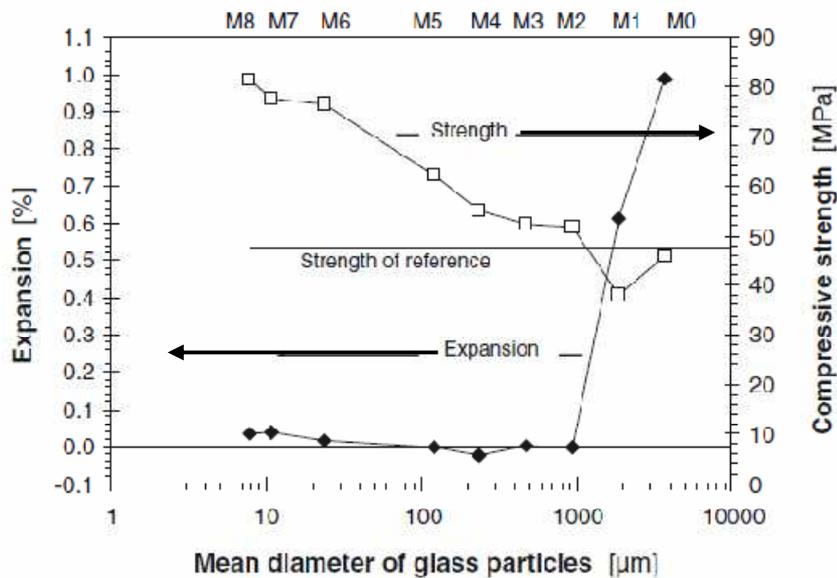


Figura 2.13 - Influência do tamanho das partículas de vidro na expansão e desenvolvimento da resistência à compressão. Barras de argamassa contendo 20% de diferentes tamanhos de partículas de vidro (78 semanas a 60°C e 100%HR) (Idir et al., 2009).

No que diz respeito à segunda parte do estudo, as curvas de expansão-tempo das argamassas contendo as combinações C0 e C1 (20% de agregado) com uma das três classes de finos C5, C6 ou C8, encontram-se na Figura 2.14. Observou-se que o recurso a partículas finas provoca uma diminuição da expansão relativamente às classes C0 e C1 usadas como substituição única. Esta redução da expansão é dependente da finura dos grãos assim como da percentagem de substituição de finos. A tendência geral é de diminuição da expansão à medida que diminui a finura das partículas, assim como a substituição por partículas finas aumenta.

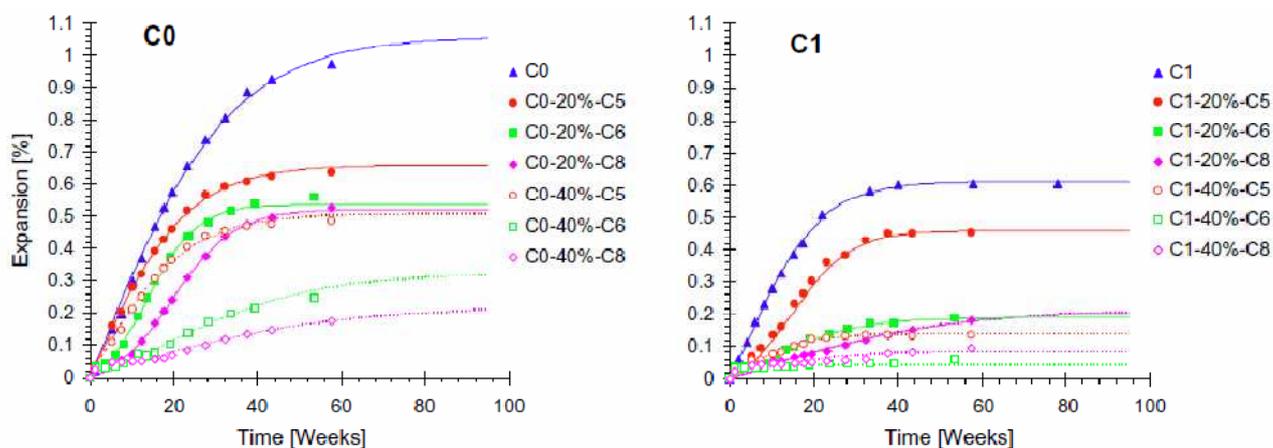


Figura 2.14 - Efeito da finura do pó de vidro na expansão ASR nas barras de argamassa contendo agregado reactivo C0 e C1 (Idir et al., 2009).

A acção do GP como redutor de ASR pode ser explicada por vários mecanismos que têm sido propostos:

→ A diluição de álcali no betão quando se recorre a pozolânas redutoras de alcalinidade como substituição parcial de cimento. Esta hipótese não pode explicar os resultados já que o vidro traz uma quantidade significativa de álcali ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ de 13,9%), levando a um maior conteúdo de álcali dos provetes;

→ Alojamento do gel na porosidade da pasta de cimento para as partículas abaixo de um determinado tamanho; esta hipótese, que é a base de vários modelos numéricos, afirma que a porosidade da pasta de cimento é capaz de acomodar os géis formados (independentemente da sua natureza) sem provocar expansão. Na verdade, foi mostrado que, dependendo do tamanho de grãos reactivos, os géis poderiam não induzir expansão ASR. Neste caso, a porosidade da pasta é suficientemente grande para que o gel tenha espaço suficiente para se difundir nesta, sem exercer tensão excessiva sobre o esqueleto sólido e deste modo não provocar o aumento de volume. Portanto, esta explicação é válida apenas quando o pó de vidro pozolânico e os agregados de vidro são usadas separadamente, mas não explica como a redução da finura do pó de vidro diminui a expansão quando a quantidade de agregados grossos permanece constante. Para o índice constante de partículas grossas, uma quantidade crescente de partículas finas pode limitar a expansão. Portanto, esta hipótese não pode ser tida em conta neste caso e outro mecanismo deve explicar os resultados obtidos;

→ A diminuição da permeabilidade do betão e, portanto, da mobilidade iónica, levam a uma redução da migração dos álcali para o agregado reactivo. Estes C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) aumentam a densidade da estrutura da pasta de cimento e levam a uma diminuição da porosidade e permeabilidade. Ao mesmo tempo, os C-S-H melhoram a resistência da pasta de cimento e consequentemente maior resistência à expansão devido às tensões originados pelo gel da ASR;

→ A produção de C-S-H pozolânicos de baixa relação C/S, que tem a capacidade de absorver uma quantidade significativamente maior de bases do que os C-S-H dum cimento sem adições, reduzindo portanto a quantidade de iões alcalinos e o pH da solução dos poros. Numa extracção da solução dos poros e posterior análise verificou-se que o uso do pó de vidro C8 nas argamassas para neutralizar a ASR das partículas de vidro grosso (C1) envolveu um aumento significativo do teor de álcali total. Embora a fracção de álcali em solução tenda a diminuir quando se aumenta a quantidade de C8 nas

misturas (o que provavelmente significa que C-S-H pozolânico absorveu mais álcali mais do que o normal), a concentração de álcali na solução permaneceu por quatro vezes maior. Uma vez que as expansões foram obtidas quando as concentrações de álcali foram maiores, isso significa que a eficiência das partículas de vidro fino, não pode ser devido apenas a captura de álcali pelos C-S-H.

2.3.3. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS E ACTIVIDADE POZOLÂNICA

A resistência mecânica do cimento é a propriedade mais importante em termos de utilização estrutural pelo que todas as normas fixam valores mínimos desta característica (Neville, 1995).

Shao *et al.* (2000) mediram a resistência mecânica de vidro sodo-cálcico como adição, através do índice de actividade pozolânica para três pós de vidro distintos:

→ Vidro 150 μ m: vidro com partículas passadas no peneiro # 100 (150 μ m) e retidas no peneiro #200 (75 μ m);

→ Vidro 75 μ m: vidro com partículas que passadas no peneiro #200 (75 μ m) e retidas no peneiro #400 (38 μ m);

→ Vidro 38 μ m: vidro com partículas que passaram pelo peneiro #400 (38 μ m).

Os resultados indicaram que a resistência das argamassas contendo vidro 38 μ m como substituto parcial de cimento satisfaz o requisito mínimo no ensaio de resistência aos 7 dias de idade, e alcançou um aumento na resistência mecânica após mais 21 dias de cura em água. Relativamente ao vidro 150 μ m, a resistência mecânica foi muito abaixo do limite, porque o tamanho das partículas de vidro era demasiado grande para agir como uma pozolana. A resistência dos provetes de argamassas com vidro 75 μ m aos 7 dias foi ligeiramente inferior ao valor limiar, enquanto que aos 28 dias a resistência aumentou satisfatoriamente.

Shayan & Xu (2004), estudaram a utilização de resíduos de vidro como agregado grosso (GGA), areia (FGA) e como substituto parcial de cimento (GP). em argamassas e betões. O GP utilizado tinha uma dimensão média de 10 μ m. O efeito da substituição parcial de cimento por GP em argamassas, com idade de 28 dias, é apresentado na figura seguinte. Verificou-se que à medida que aumenta a percentagem de substituição, a resistência à compressão diminui.

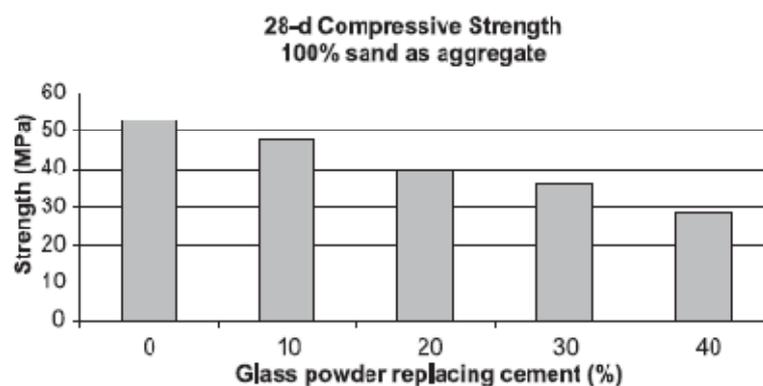


Figura 2.15 – Efeito na resistência à compressão da substituição de cimento por GP em argamassas (Shao *et al.*, 2000).

Estes autores também estudaram a evolução a longo prazo da resistência à compressão em argamassas contendo GP (20% e 30%), comparando com argamassas de CTL e SF (10 % de substituição de cimento por sílica de fumo). Os resultados indicaram que a SF produziu um ganho de resistência relativamente às duas argamassas de GP e mesmo em relação ao CTL. Os resultados obtidos também apontaram que os provetes de argamassa contendo GP continuaram a desenvolver resistência com o tempo, o que indica actividade pozolânica. Em cilindros de betão, a substituição parcial de cimento por GP, também originou perdas de resistência, verificando-se, mais uma vez, que quanto maior a percentagem de substituição, maior a perda de resistência para qualquer idade.

Shi et al. (2005) avaliaram o índice de actividade pozolânica de quatro resíduos de vidro em pó de provenientes de um fabricante de esferas de vidro, sendo eles:

- GP - pó de vidro moído;
- GP de poeiras - recolhido a partir de um colector de poeira na moagem do vidro;
- E outros dois, GP-4000 e GP-6000, a partir da moagem do pó e da poeira do colector.

O GP apresentou uma granulometria muito grosseira, sendo constituído por partículas de 4-70 μm . O GP de poeiras foi mais fino do que este, mas mais grosseiro do que o cimento Portland. O cimento Portland contém cerca de 40% das partículas menores que 10 μm , enquanto o GP de poeira continha apenas cerca de 20% de partículas menores que 10 μm . A granulometria do pó de vidro moído GP-4000 era próxima da de um cimento Portland no intervalo de partículas menores que 30 μm , no entanto apresenta uma distribuição mais grosseira nas partículas maiores que 30 μm . O GP-6000 era o mais fino, mas ainda com uma porção de partículas superiores a 60 μm .

O índice de actividade desses pós de vidro e cinzas volantes estão ilustrados na Figura 2.16. Pôde observar-se que o GP foi o que apresentou o menor índice de actividade pozolânica entre os materiais testados devido às suas partículas de maior dimensão. Os seus índices de actividade pozolânica, foram em torno de 70-74% aos 7 e 28 dias, ligeiramente inferiores ao mínimo de 85% (NP 4220 para 28 dias). Embora o tamanho das partículas do GP de poeiras também fossem mais grosseiras do que as partículas de cinzas, o índice de actividade pozolânica foi apenas ligeiramente inferior a até aos 7 dias, mas aos 28 dias foi bastante superior ao das cinzas volantes, apresentando um valor de 82% aos 7 dias e 92% aos 28 dias. No que se refere à resistência, pode ser considerado um bom material pozolânico. A única preocupação para a utilização deste material como substituto do cimento no betão é a reacção álcali-sílica quando é usado um agregado alcalino reactivo. Embora o GP-6000 apresente partículas mais finas do que o GP-4000, houve apenas uma diferença marginal no índice de actividade pozolânica destes dois. Por outro lado, o GP-4000 e o GP-6000 apresentaram índices de actividade pozolânica similares ou ligeiramente superiores às cinzas volantes numa idade até 7 dias. Aos 28 dias, o índice de actividade pozolânica do GP-4000 e do GP 6000 foi até cerca de 110%, que é muito maior do que das cinzas volantes (85%). Isto indica que estes dois têm muito pó de vidro de alta reactividade pozolânica.

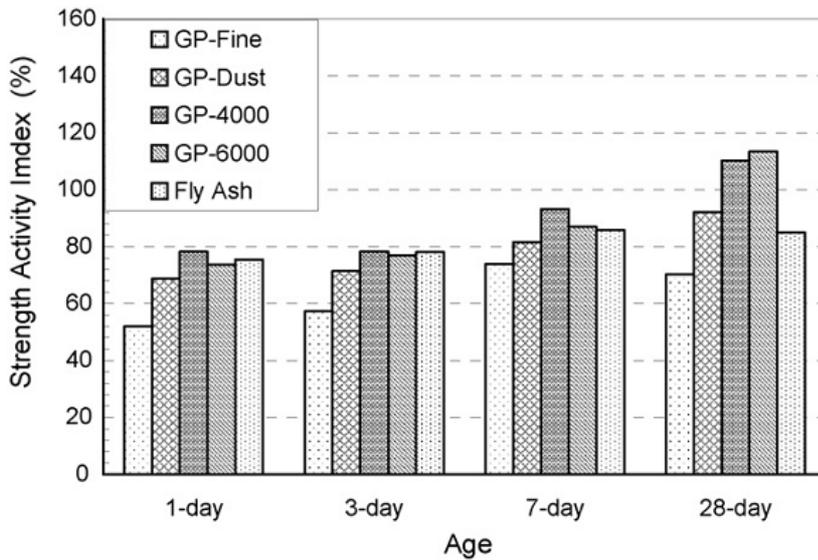


Figura 2.16 – Índice de Actividade pozolânica dos pós de vidro e cinzas volantes (Shi et al., 2005).

Mais uma vez, *Shayan & Xu* (2006) realizaram 10 betões diferentes com diversas composições que incorporaram pó de vidro como substituição parcial de cimento (20-30% em massa de cimento), areia de vidro em substituição da areia natural (40-75% em massa de areia) ou estas duas em simultâneo.

As misturas 3 e 4 correspondem a um betão onde o cimento foi substituído parcialmente por 20% e 30% por GP, respectivamente, e a mistura 1 corresponde à mistura de CTL (100% cimento). O GP utilizado neste trabalho pertence ao tipo sodo-cálcico silicatado, proveniente de resíduos domésticos, que depois de moído apresentou uma dimensão nominal de 10µm (88% das partículas tem dimensão menor que 10µm e as restantes tem dimensão maior do que 15µm). Tanto as mistura 3 como a mistura 4 mostraram resistência à compressão sempre inferior ao betão de CTL para todas as idades, sendo a mistura 4 a que apresentou maior perda de resistência, cerca de 20 MPa, para uma idade de 404 dias. Na mistura 3, o prejuízo de resistência é apenas ligeiro.

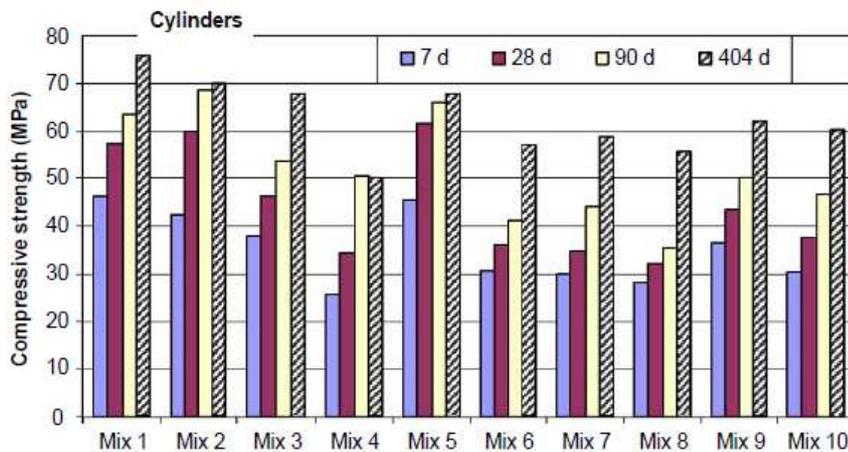


Figura 2.17 – Resistência à compressão de cilindros de betão em várias idades (Shyan & Shu, 2006).

Corinaldesi et al. (2005) levaram a cabo um estudo com objectivo de estudar a possibilidade de reutilizar resíduos de vidro sodo-cálcicos provenientes da moagem de recipientes e de resíduos de demolição de construções da região de Toscana (Itália) como agregados em argamassas e betões.

Três diferentes fracções de resíduos de vidro foram examinadas, sendo caracterizadas pela distribuição do tamanho dos grãos: uma fracção mais fina, rotulado como um Vidro A, caracterizada pelo tamanho de partícula de até 36 μm , uma fracção média, o vidro B, caracterizado por partículas tamanho variando entre 36 e 50 μm e a fracção mais grosseira, o vidro C, com partículas de tamanho variando de 50 até 100 μm . Neste estudo o cimento usado foi CEM II/A-L 42.5 R. Foram testadas 7 argamassas, uma de controlo, três com 70% de substituição de agregado por cada tipo de vidro (A-70, B-70 e C-70) e mais três com 30% de substituição de agregado por cada tipo de vidro (A-30, B-30 e C-30). Para uma melhor compreensão a composição da cada argamassa é dada na Tabela 2.5.

Os provetes, de dimensão 40x40x160, permaneceram em cura húmida durante 24h, nos 27 dias seguintes foram curados ao ar a 20° C. Depois foram imersos em água 100 dias. Finalmente foram mantidos 24h em água em ebulição e subsequente arrefecimento ainda dentro de água.

Tabela 2.4 - Composição das argamassas usadas no estudo de *Corinaldesi et al.*

Mixtures	W/C	Dosages (g)					
		Water	Cement	Inert	Glass A	Glass B	Glass C
Ref	0.56	250	450	1350	–	–	–
A-70	1.00	450	450	405	945	–	–
B-70	1.00	450	450	405	–	945	–
C-70	1.00	450	450	405	–	–	945
A-30	0.67	300	450	945	405	–	–
B-30	0.67	300	450	945	–	405	–
C-30	0.67	300	450	945	–	–	405

Os resultados de resistências mecânicas, determinados de acordo com a NP EN 196-1, apresentam-se na figura seguinte. Embora os provetes com resíduos de vidro fossem caracterizados por uma razão w/c superior relativamente ao controlo, apresentaram maior resistência tanto à flexão como à compressão para qualquer tipo de vidro e qualquer percentagem de substituição. Isto deveu-se, com certeza, à pequena dimensão dos resíduos de vidro em relação, comparados com o agregado que substituíram parcialmente.

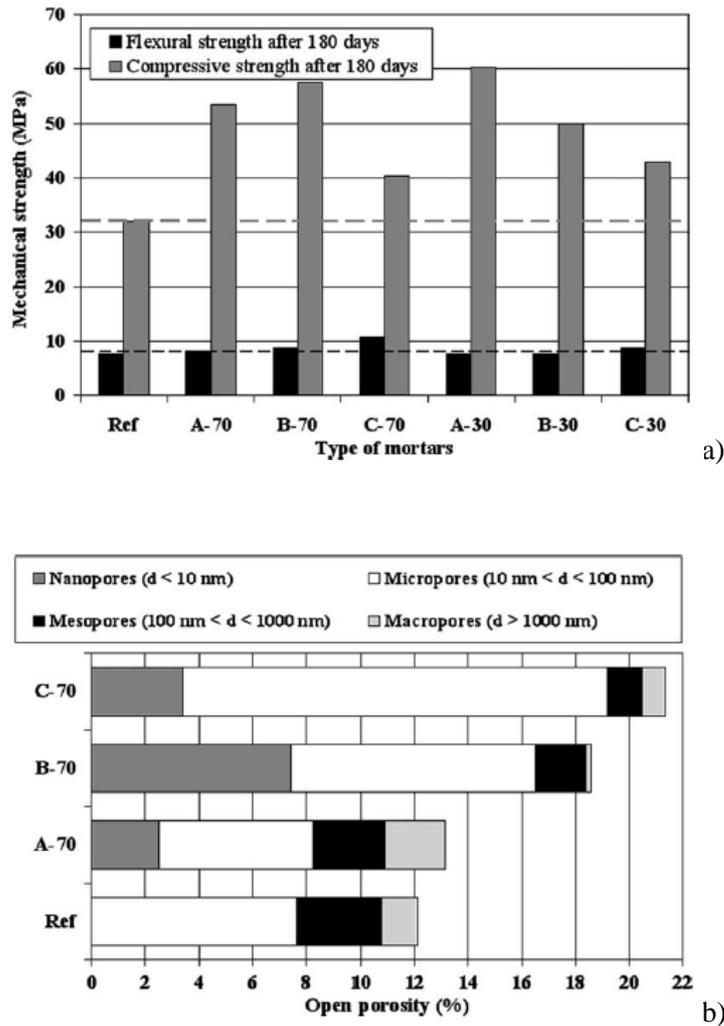


Figura 2.18 – a) Resistências à flexão e compressão das argamassas após 180 dias de cura; b) Estrutura porosa das argamassas após 180 dias de cura. (Corinaldesi et al, 2005)

Com intuito de encontrar uma razão plausível para os resultados obtidos no que diz respeito às resistências mecânicas, foram realizadas observações com a ajuda da microscopia eletrônica de varrimento. Verificou-se que a estrutura das argamassas contendo resíduos de vidro eram mais densas do que a de controle.

Mais uma vez, com a finalidade de justificar os resultados, foi realizada uma caracterização da rede porosa, recorrendo à técnica do porosímetro de mercúrio, representada na Figura 2.18(b). As argamassas com resíduos de vidro, mostraram maior porosidade aberta em relação à argamassa de controle, porém a dimensão média dos poros é superior nestas.

Ducman et al. (2002) relataram uma experiência semelhante, concluíram que, na presença de vidro moído finamente, uma certa reação ocorre entre os álcalis do cimento e a sílica do vidro, mas a expansão relacionada não causa qualquer consequência prejudicial a nível macroscópico e observa-se até um positivo refinamento da microestrutura.

Chunques et al. (2006) avaliaram o comportamento do betão com pó de vidro, sendo este último retirado do processo de transformação de chapas de vidro, empregando-o como material aglomerante

na produção do betão. Foram utilizados provetes cilíndricos de dimensão 100x200mm e provetes prismáticos de dimensão 750x150x150mm, moldados e curados conforme a NBR 5738.

O pó de vidro passou por um processo de moagem mais eficiente, deixando-o com uma granulometria mais reduzida. Os resultados obtidos com idade de 28 dias mostram que o pó de vidro finamente pulverizado possui acção pozolânica, confirmando os resultados encontrados por outros autores como *Shao et al.* (2000), *Lopes & Azevedo* (2003), *Babu & Prakash* (1995). As resistências à compressão do betão com 10% e 15% de pó de vidro equivaleram a um crescimento de 30% e 10%, respectivamente, comparando com o valor da resistência apresentado pelo betão de referência

Schwarz et al. (2008) realizaram um estudo em cinco traços de betão. Dez por cento de cimento, em massa, foi substituído por pó de vidro e cinzas volantes em dois betões distintos, sem alterar a razão água ligante (w/c) (misturas designado 10GP e 10FA, respectivamente). Noutras duas misturas, 10% de cimento em massa foi substituída por pó de vidro e cinzas, e a razão w/c foi reduzida de forma a proporcionar a mesma trabalhabilidade em todas as misturas (10GPR e 10FAR, respectivamente).

A resistência à compressão do betão de controlo é maior do que os betões modificados em todas as idades. Durante os primeiros 28 dias, nos betões cuja razão w/c corresponde a 0,40, o betão com 10% de pó de vidro tem maior resistência à compressão do que o betão com 10% de cinzas volantes, indicando o aumento da hidratação do cimento na presença de pó de vidro, como relatado antes. No entanto, aos 90 dias, nos mesmos betões, o de 10% cinzas volantes apresentou uma maior resistência à compressão do que a mesmo betão com 10% de pó de vidro, indicando que a reacção pozolânica de cinzas é mais eficaz do que a reacção secundária de pó de vidro. Isso também pode ser atribuído ao tamanho das partículas utilizadas neste estudo - o pó de vidro, tem apenas 25% das partículas mais finas de 10 µm, enquanto as cinzas volantes e cimento tem 30% e 40%, respectivamente, de partículas inferiores a 10 µm. A tendência acima mencionada de resistência à compressão também se verificou no conjunto de betões com razão w/c reduzida. Até 28 dias, mostraram relativamente a mesma tensão resistente, mas a mistura de cinzas volantes apontou mais resistência do que o pó de vidro de 90 dias, pelo motivo mencionado anteriormente. Enquanto ao dia 28 a resistência do pó de vidro foi igual ou superior às cinzas para a respectiva razão w/c, a resistência aos de 90 dias das cinzas foi superior.

Com base nos resultados obtidos para idades iniciais e mais avançadas, a resistência à compressão, e o conteúdo de hidróxido de cálcio no controlo, no pó de vidro e nas cinzas volantes cuja razão w c é 0,42, observou-se, neste estudo que 10% substituição do cimento por o pó de vidro é viável em materiais cimentícios.

Segundo *Tittarelli & Moriconi* o desenvolvimento com o tempo da resistência à flexão e à compressão de argamassas e betão auto-compactável fabricados com o GP como agregado ou substituição de parcial de cimento mostraram que a adição de GP causou uma forte redução na resistência à compressão (até cerca de 25%, dependendo da taxa de adição).

2.3.4. PENETRAÇÃO DE CLORETOS

2.3.4.1. Considerações gerais

As armaduras encontram-se à partida protegidas da corrosão por uma finíssima camada de passivação, formada devido à elevada alcalinidade do betão ($\text{pH} > 12$) (Coutinho, 2002).

A penetração de cloretos através da camada de recobrimento, se suficiente para atingir as armaduras, constitui um dos processos capazes de destruir a película passiva e assim permitir o início da corrosão das armaduras se as condições de humidade e oxigénio forem suficientes. Os iões cloreto intervêm nas reacções e aceleram a dissolução do ferro. Os iões cloreto actuam como catalisadores na "picada", que actua como ânodo e intervêm nas reacções, acelerando a dissolução do ferro (Coutinho, 2002).

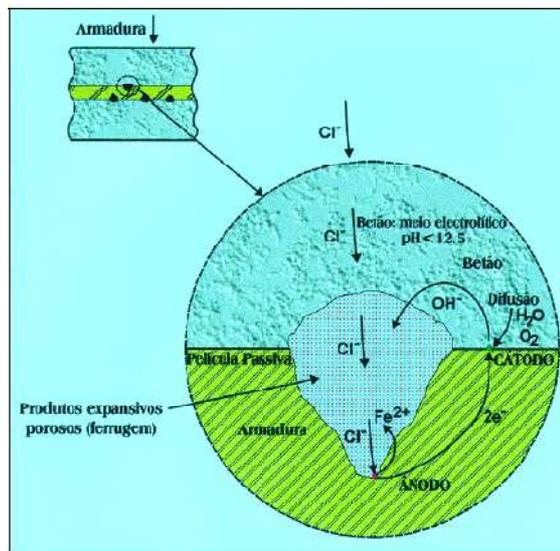


Figura 2.19 - Corrosão da armadura por "picadas" causada por cloretos (Coutinho, 2002., adaptado de Durar, 1997).

A humidade e o transporte de iões no interior do betão são parâmetros fundamentais no que diz respeito à vida útil de estruturas de betão armado pelo que se encontram bem estudados actualmente. A penetração do ião cloreto e a consequente corrosão das armaduras é crítico quando se trata de pontes e outras estruturas de transporte sujeitas a ciclos de gelo-degelo, assim como estruturas em ambiente marítimo ou costeiro (Jain & Neithalath, 2010). O uso de materiais de substituição de cimento como cinzas volantes, sílica de fumo e metacaulino tem sido investigado e é benéfico na resistência à penetração de iões cloreto no betão porque microestrutura torna-se mais compacta devido à reacção pozolânica e hidratação secundária desses materiais. O pó de vidro é um material amorfo com grande quantidade de sílica, reunindo assim as condições primordiais para ser uma pozolâna.

Estes testes são perfeitamente conhecidos e exequíveis (embora existam algumas limitações nalguns deles, que estão devidamente esclarecidas). A influência dos métodos de ensaio, especificamente a concentração de uma solução catódica de cloreto ou solução de cloreto utilizada para pré-condicionamento dos provetes, a duração do ensaio, bem como a composição química dos materiais de substituição do cimento (Classe F cinzas e pó de vidro) resultam em modificações micro estruturais e as variações dos parâmetros medidos foram discutidas minuciosamente por Jain & Neithalath.

A permeabilidade aos cloretos pode ser determinada segundo vários métodos. Os três métodos habitualmente usados são, o ensaio rápido de permeabilidade aos cloretos (RCP), o ensaio por migração não-estável (NSSM) e a condutividade em regime estacionário (SSC).

O ensaio rápido da permeabilidade de cloreto, RCP, baseado na norma ASTM C 1202 fornece uma indicação da resistividade ou condutividade do betão, que por sua vez, expressa um índice de penetração de iões cloreto no betão. Os provetes com 50 milímetros de espessura são acondicionados pela saturação de vácuo, e colocados numa célula ladeada por reservatórios que contêm uma solução de NaOH 0,3 N, por um lado e 3% de solução de NaCl sobre o outro. Uma diferença de potencial de 60V é aplicada entre os eléctrodos colocados em ambas as faces da peça, por um período de 6 h. A taxa total que passa (em coulombs) ao final de 6h de ensaio é o valor do RCP. O teste de RCP basicamente mede a condutividade (ou resistividade) de betão, que depende tanto da estrutura dos poros, bem como a composição da solução dos poros. A condutividade da solução dos poros pode mudar devido ao aquecimento ohmico, e mudanças microestruturais podem ser induzidas por electromigração nas condições do presente ensaio. Para betões contendo cimento com adições, a composição química da solução dos poros também sofre mudanças, devido ao consumo de cálcio.

O ensaio NSSM, da norma NT Build 492 e na qual é baseada a especificação LNEC E-463, evita algumas das desvantagens do teste de RCP. Neste teste, os provetes são pré-condicionados numa solução saturada de Ca(OH)_2 e a duração do teste depende da medição de corrente inicial devido à aplicação de um potencial eléctrico de 30V. O católito e soluções utilizadas são 2 N de NaCl (10%) e 0,3 N NaOH, respectivamente. Após um período de ensaio especificado (que depende da corrente inicial), a amostra é dividida ao meio por compressão diametral e uma solução de nitrato de prata pulverizado sobre as secções. A profundidade de penetração de cloretos é medida a partir da precipitação de cloreto de prata branca visível. Neste ensaio é calculado o coeficiente D_{nsm} a partir do valor médio da profundidade de penetração.

Tabela 2.5 – a) Resistência à penetração de cloretos baseada nos resultados do ensaio NT Build 492.

b) Penetração de cloretos de acordo com a carga passada através dos provetes-RCP.

a)		b)	
D_{nsm} ($10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	Resistência do betão	Q (Coulombs)	Penetração de cloretos
>15	reduzida	>4000	elevada
10-15	moderada	>2000 e <4000	moderada
5-10	elevada	>1000 e <2000	reduzida
2,5-5	muito elevada	>100 e <1000	muito reduzida
<2,5	ultra elevada	<100	desprezável

2.3.4.2. Ataque por cloretos e GP

Jain & Neithalath (2010) realizaram os ensaios em betões de controlo e em betões com adições, uma das quais GP (com dimensão média das partículas de 20 μm), com o objectivo de testar a sua resistência ao ataque por cloretos.

Os resultados do teste rápido da permeabilidade de cloreto (RCP) dependem tanto da microestrutura do betão, bem como da condutividade da solução dos poros. Um betão com a mesma microestrutura pode revelar aumento dos valores de RCP se a condutividade da solução dos poros é maior. Mais iões alcalinos são liberados na fase aquosa por uma certa quantidade de pó de vidro, e consequentemente a contribuição de álcali para a mesma quantidade de cimento que substitui, aumentando assim a condutividade da solução dos poros do pó de vidro nos betões modificados. Contudo, os betões incorporando pó de vidro mostraram valores inferiores ou similares de RCP em relação ao betão de controlo para todas as idades.

No ensaio de difusão de cloretos em regime não estacionário, cujos resultados se apresentam na Figura 2.20. A tendência geral é diminuição do coeficiente à medida que aumenta o tempo de cura. Aos 28 dias o betão CTL apresentou um coeficiente ligeiramente inferior aos betões GP. Após 56 dias de cura, o GP20 melhorou substancialmente, sendo mais resistente aos cloretos do que o CTL, e GP10 foi muito semelhante a este. Finalmente, com 90 dias de cura, o coeficiente de difusão do GP20 foi cerca de metade do CTL, e o GP10 manteve-se idêntico a este. Isso mostra mais uma vez que o pó de vidro é benéfico densificando a microestrutura do material ao longo do tempo.

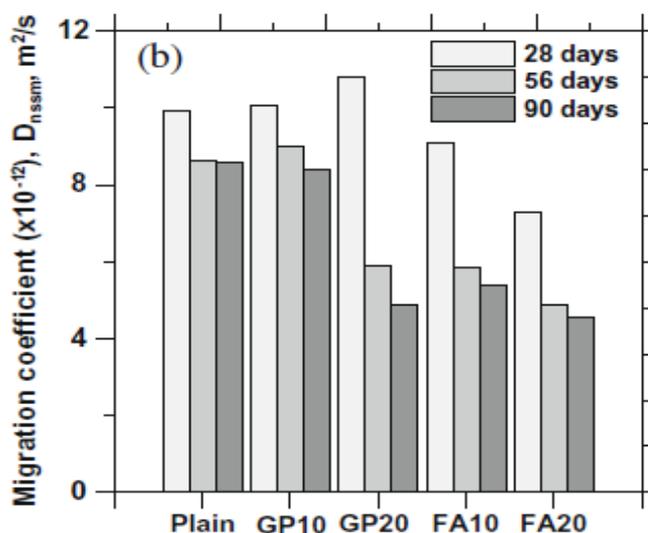


Figura 2.20 - Coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (NT Build 492) (Jain & Neithalath, 2010).

O ensaio rápido da permeabilidade de cloreto (RCP) realizado em provetes de betão com idades de 28, 56 e 90 dias, de acordo com a norma ASTM C 1202 originou os valores penetração de cloretos (carga passou através das amostras, em coulombs) ilustrados na Figura 2.21 (Schwarz *et al.*, 2008). Para os provetes com 28 dias de idade, os valores mais elevados RCP foram obtidos para os provetes de betão de controlo. Os valores de RCP referentes ao pó de vidro e cinzas volantes são mais baixos, indicando algum grau de refinamento dos poros nessas misturas. Aos 28 dias os valores RCP de todas as misturas ficaram na categoria de "elevado", em concordância com a norma ASTM C 1202. Aos 56 e 90 dias de cura húmida, os resultados foram ligeiramente inferiores em relação a uma idade de 28 dias

conforme o esperado. Todas as misturas pertenceram à categoria "moderado" aos 56 dias, é "moderado-baixo" após 90 dias. Com o aumento da duração de cura, os valores observados relativamente à penetração de cloretos nos betões simples e com adições, foram menores. Os valores RCP dos betões com aditivos foram inferiores aos betões de controlo nas primeiras idades, enquanto em idades posteriores os valores começam a aproximar-se.

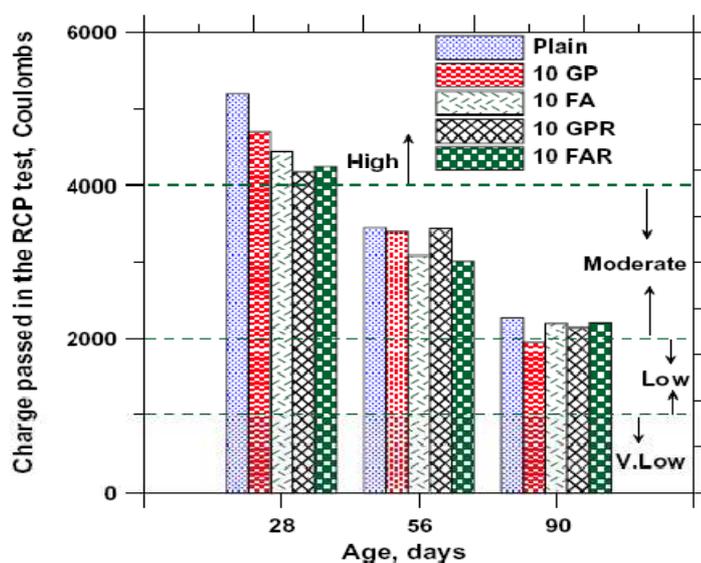


Figura 2.21 - Valores referentes à penetração acelerada de cloretos para betão incorporando pó de vidro e cinzas volantes e para o betão de controlo (Schwarz *et al.*, 2008).

Segundo Shayan & Xu (2006), a penetração de cloretos nas misturas de betão que continham pó de vidro (com substituição de 20% e 30%), foi significativamente menor do que a mistura de referência, e análogo ou menor do que os provetes que continham sílica de fumo. Além disso, os cilindros que tiverem cura húmida apresentaram menor permeabilidade aos cloretos do que os núcleos (exposição externa), indicando que o GP pode ser muito benéfico sob condições de exposição submersa marinho contra a corrosão induzida por cloreto de reforço em betão. A relação entre o volume de vazios permeáveis e a penetração de cloreto de era quase inexistente, indicando que o último foi influenciado principalmente pela composição química da solução que circula nos poros do betão e pelos poros e não por diferenças relativamente pequenas nos volume de vazios permeáveis.

2.3.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água por capilaridade foi estudada por Shwarz *et al.* (2008), no mesmo estudo já referido nas resistências mecânicas e na resistência à penetração de cloretos. O ensaio foi realizado em provetes cilíndricos de betão (100mm de diâmetro e 200mm de altura) e o cimento utilizado foi do tipo I. Estes autores avaliaram a absorção de água a curto prazo e a longo prazo. A absorção a curto prazo foi determinada pela absorção às 4 horas, traçando a recta aumento de peso por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 2.22.

Para um tempo de cura superior a quantidade de água absorvida é menor, principalmente no betão de CTL, diminuindo o coeficiente S para cerca de metade.

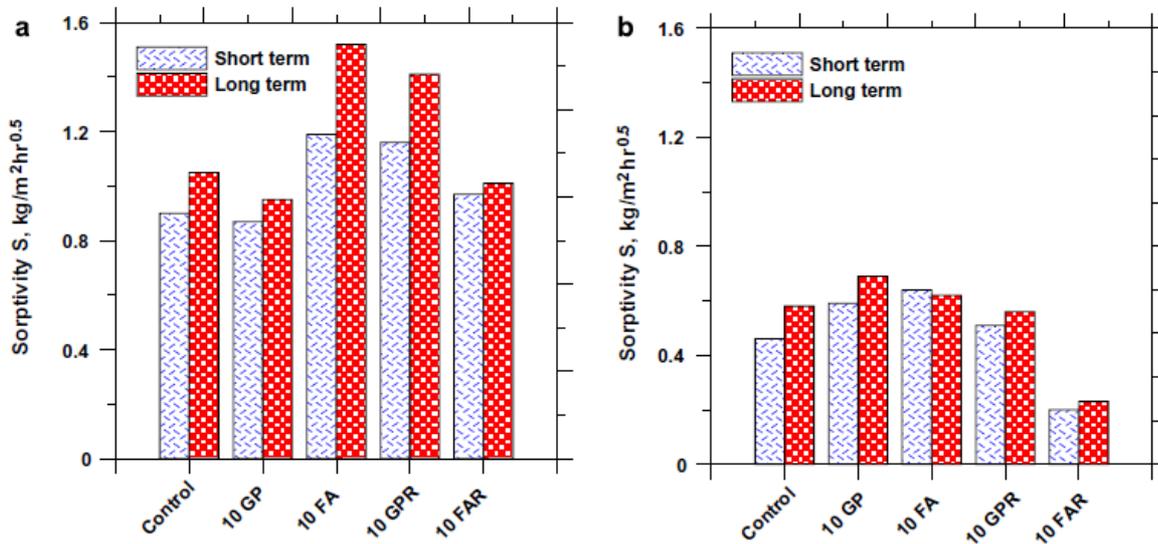


Figura 2.22 - Absorção de água a curto prazo (4 horas) e longo prazo (672 horas), (a) após 14 dias em cura húmida, (b) e após 90 dias em cura húmida. (Schwarz et al., 2008)

2.3.6. BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DO USO DE VIDRO

A reutilização de resíduos de vidros em cimento e produção de betão tem muitos benefícios:

- Reduz os custos de eliminação de resíduos, que são susceptíveis de aumentar devido ao imposto sobre o aterro.
- Conserva o ambiente ao poupar grande quantidade de matérias-primas a cada ano.
- Prolonga a vida dos locais de aterro, contribuindo para a conservação da paisagem.
- Salva uma quantidade significativa de energia e reduz a quantidade de CO₂, NO_x e outros poluentes do ar emitidos pelos fabricantes de clínquer quando o pó de vidro é utilizado como um substituto parcial do cimento.
- Aumenta a consciência pública do problema dos resíduos e os benefícios da reciclagem.
- Oferece vários usos alternativos para os produtos com base de vidro reciclado, sem comprometer o custo ou qualidade.

2.4. BIBLIOGRAFIA

Agência Portuguesa do Ambiente - <http://www.iambiente.pt>

Ahmad Shayan, Aimin Xu. *Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs*. Cement and Concrete Research 36, 2006, pp 457–468, Vermont South, Victoria, Australia.

Andrea Saccani, Maria Chiara Bignozzi. *ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete*. Cement and Concrete Research 40,2010, pp 531–536, Bologna, Italy.

ASTM C 109/90 - ASTM Designation C109-90-*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Philadelphia.

ASTM C 230 - ASTM Designation C230M-98-*Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of hydraulic Cement*. Philadelphia.

Babu, K. G. & Prakash, P.V. Efficiency of silica fume in concrete; Cement and Concrete Research, vol. 25, nº 6, pp. 1273-1283. 1995.

Bashar Taha, Ghassan Nounu. *Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors*. Cement & Concrete Composites 30, 2008, pp 497–505.

Caijun Shia., Yanzhong Wua., Chris Rieflerb., Hugh Wangc. *Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders*. Cement and Concrete Research 35, 2005, pp 987– 993.

Caijun, Shi., Keren Zheng. *A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete*. Resources, Conservation and Recycling 52, 2007, pp 234–247.

Chatterji S. The role of Ca(OH)₂ in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction. Cem Concrete Research 1979; 9(2, March 1979):185–8.

Chunques, Giselle Martinelli., Fernandes, Pâmela Cristina., Lintz, Rosa Cristina Cecche. *Avaliação do comportamento do betão com pó de vidro (Evaluation of mechanical behavior of concrete with glass powder*. Congresso Brasileiro do concreto, Setembro 2006, Brasil.

Comissão Europeia do Ambiente - <http://ec.europa.eu/environment>

Coutinho, J. S.. *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*. Dissertação para doutoramento, 392 pp. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 24 Julho, 1998. (publicado em livro em 2005).

Dhir R., Dyer T., Tano A., Cui Y.. *Towards maximizing the value and sustainable use of glass*. Concrete 2004, 38(1):38–40.

Diamond S. ASR another look at mechanisms. In: Proceeding 8th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete. New York: Elsevier Science; 1989. p. 83–94.

F. Tittarelli., G. Moriconi. *Use of GRP industrial by-products in cement based composites*. Cement & Concrete Composites 32, 2010, 219–225, Ancona, Italy.

Ferreira, Vitor Gois., Pereira, Teresa Costa., Torres, Pedro., Maciel, Hugo. *Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, 1990-2005 Submitted under the United Nations Framework*. Edition Institute for the Environment, Amadora, 2007.

Figg, J.W. *Reaction between Cement and Artificial Glass in Concrete*. In: Proceedings of Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa, 1981, paper S252/7, 19p.

Fragata, Ana., Veiga, Maria do Rosário., Velosa, Ana Luisa., Ferreira, V.M.. *Incorporação de resíduos de vidro em argamassas de revestimento – avaliação da sua influência nas características da argamassa*. LNEC, Lisboa.

G. D. Perkins. *Development of Concrete Containing Waste Glass*. Faculty of Advanced Technology, University of Glamorgan, Pontypridd.

Helmuth R. *Alkali-silica reactivity: An overview of research*. Washington, D.C. Strategic Highway Research Program SHRP-C-432, National Research Council; 1993.

I.B. Topcu, C. Canbaz.. *Properties of concrete containing waste glass*. Cem. Concr. Res. 34, 2004, pp 267–274.

IAPMEI – Rede de Gabinetes de Empresa - Branca Soares – Maio 2007 - <http://www.iapmei.pt/>

ICE Manual of Construction Materials. Institution of Civil Engineers, 2009.

Instituto Português da Qualidade - *Betão: Parte 1, especificação, desempenho, produção e conformidade*. NP EN 206-1: 2007, Lisboa, IPQ, 2007.

Instituto Português da Qualidade - *Método de ensaio de cimentos: Parte 3 - Determinação do tempo de presa e da expansibilidade*. NP EN 196-3, IPQ, 1996.

Instituto Português da Qualidade - *Método de ensaios de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas* NP EN 196-1. Lisboa, IPQ, 1996.

J. Reindl, *Report by recycling manager*. Dane County, Department of Public Works, Madison, USA, August 1998.

Jain, Jitendra A., Neithalath, Narayanan. *Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure*. Cement & Concrete Composites 32, 2010, pp 148–156, United States.

Johnston CD. Waste glass as coarse aggregate for concrete. J Test Eval 1974;2:344–50.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - *Betões. Determinação da absorção de água por Capilaridade E393*. LNEC, Lisboa, 1993a.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - *Betões. Determinação da resistência à carbonatação E391*. LNEC, Lisboa, 1993b.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil – *Betões. Metodologias para prevenir reacções expansivas internas. E-461*. LNEC, Lisboa, 2004.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - *Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário E463*. LNEC, Lisboa, 2004.

López, Diosnel A.Rodriguez; Azevedo, Carlos Antônio Pizzá. *Avaliação da utilização de vidro cominuído como material agregado ao concreto*. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville – Santa Catarina 14 a 19 de Setembro de 2003.

Maltha, J. C.; Dalmijn, W. L.; Van Houwelingen, J. A.. *Glass Recycling Towards Year 2000*. Proceedings of the International Recycling Congress, v.3, p.185-198, Geneva, 1993.

Maria Schultz Loup, Salvador Villagrasa, Celso Figueiredo Gomes. *The manufacture of glass pot furnaces in Marinha Grande (Portugal) during the last decades of the 19th centur*. Journal of Cultural Heritage 9, 2008.

- Mata, Teresa Margarida Correia de Poço. *Comparação de Processos de Reutilização/Reciclagem Usando a Metodologia de Análise de Ciclo-de-Vida*. FEUP, Porto, 1998.
- McLellan, G. W., Shand, E. B.. *Glass Engineering Handbook*, McGraw-Hill, Inc, 1984.
- Mendes, José Amado. *As empresas vidreiras e o desenvolvimento regional em Portugal: da autarquia (1870-1914) à internacionalização (1980-2000)*.
- Meyer C, Egosi N, Andela C. *Concrete with waste glass as aggregate*. In: Recycling and reuse of glass cullet. Proceedings of the international symposium, March 2001. Concrete Technology Unit of ASCE and University of Dundee; 2001.
- Mukesh C. Limbachiya. *Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete*. Construction and Building Materials 23, 2009, pp 1078–1083.
- Nathan Schwarz, Narayanan Neithalath. *Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration*. Cement & Concrete Composites 30, 2008, pp 486–496, United States.
- Neithalath N. *Behavior of cement pastes incorporating a coarse nonreactive filler*. In: Claisse P, editor. Proceedings in CD of the international conference on sustainability of construction materials and structures, Coventry, UK, June 2007.
- Neville, A. M.. *Properties of concrete*. 4th ed. Harlow: Addison Wesley Longman, 1995
- Ortiz, S.A. *O Vidro e as Embalagens de Vidro*. CETEA/ITAL, Campinas, Brasil, 1996.
- Pereira, Luiz A. P., Santos, Pedro M. S. Santos. *Resíduos reciclados como componentes de argamassa*. Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- S. Multon, M. Cyr, A. Sellier, N. Leklou, L. Petit.. *Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion*. Cement and Concrete Research 38, 2008, pp 350–359.
- S.B. Park, B.C. Lee, J.H. Kim, *Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate*, Cem. Concr. Res. 34, 2004, pp 2181–2189.
- Saccani, Andrea., Bignozzi, Maria Chiara Bignozzi. *Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion*. Cement and Concrete Research 38, 2008, pp 350–359, France.
- Sangha CM, Alani AM, Walden PJ. *Relative strength of green glass cullet concrete*. Mag Concr Res 2004;56(5):293–7.
- Schwarz N, DuBois M, Neithalath N. *Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes*. Cem Concr Compos 2007;29:656–66.
- Seung-Bum Park, Bong-Chun Lee. *Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers*. Cement and Concrete Research 34,2004, pp 1145–1152, South Korea.
- Shayan, Ahmad., Aimin X. *Value-added utilization of waste glass in concrete*. Cement and Concrete Research 34,2004, pp81–89, ARRB Transport Research Ltd., 500 Burwood Highway, Vermont South, Victoria, 3133, Australia.
- Shelby,James E.. *Introduction to glass science and technology*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1997.
- Silva, António Santos., Fernandes, Isabel., Castro, Nélia. *A problemática da avaliação da reactividade aos álcali de agregados graníticos para betão*. Encontro Nacional de Betão Estrutural, Guimarães, 2008.

Silva, H. Santos. *Estudo do envelhecimento das barragens de betão e de alvenaria – Alteração físico-química dos materiais*. Tese. LNEC, 1992.

T.D. Dyer, R.K. Dhir. *Chemical reactions of glass cullet used as cement component*. J. Mater. Civ. Eng. 13, pp 412–417, 2001.

Terro, M.J.. *Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures*. Building Environ 2006;41(5):633–9.

V. Corinaldesi, G. Gnappi, G. Moriconi, A. Montenero. *Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars*. Waste Management 25, 2005, pp 197–201.

Yin-Wen Chan., Shu-Hsien Chu. *Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete*. Cement and Concrete Research 34, 2004, pp 1167–1172, Taipei, Taiwan.

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

Para determinar as potencialidades de utilização de GP como substituto parcial do cimento no betão considerou-se a abordagem habitual de estudar as propriedades em argamassa em primeiro lugar. Assim realizou-se um programa experimental utilizando argamassa em que o cimento Portland (CEM I 42.5R da SECIL) foi substituído em 10% ou 20% de GP, isto é, GP10 e GP20 respectivamente. Como argamassas de controlo foram consideradas, uma com 100% de cimento, e outra com substituição de 10% do cimento por sílica de fumo (SF). Procedeu-se à comparação de resultados de diversos parâmetros, entre as argamassas de controlo e as de GP.

Nas argamassas foram utilizados os seguintes constituintes:

- Cimento CEM I 42,5 R cedido pela SECIL (fábrica da Maceira Liz);
- Areia normalizada CEN;
- Pó de vidro (fornecido pela fábrica A. J. Oliveira Cascos de Vidro, LDA);
- Sílica de fumo;
- Água destilada;
- Superplastificante Sika ViscoCrete 3000.

Para os devidos efeitos foram realizados vários ensaios sobre as argamassas, sendo eles:

- Avaliação da trabalhabilidade (ASTM C 109/90 e ASTM 230);
- Ensaio das resistências mecânicas – compressão e flexão (NP EN 196-1);
- Ensaio de carbonatação acelerada (E-391);
- Ensaio de absorção de água por capilaridade (com base na E-393);
- Ensaio de penetração acelerada de cloretos (E-463);
- Ensaio da barra de argamassas – ASR – reacção álcali-sílica (ASTM C 1260-94);

Também foram realizados ensaios com as pastas (100% de cimento e substituição de 10% e 20% por GP), nas quais se determinou o tempo de presa e da expansibilidade (NP EN 196-3).

Nos pós, cimento e GP, foram também realizadas:

- Análise química (NP EN 196-2);

- Análise granulométrica;
- Determinação da massa volúmica (E-64);

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1. CIMENTO

Para a produção das argamassas optou-se pela escolha de um cimento CEM I 42.5R sendo este o cimento com menor percentagem de adições correspondendo a sua composição a pelo menos 95% de clínquer de cimento Portland tornando-se assim o mais indicado para este tipo de estudo. A figura seguinte apresenta o resultado de uma análise granulométrica por difractometria laser efectuada no granulómetro laser do LABEST:

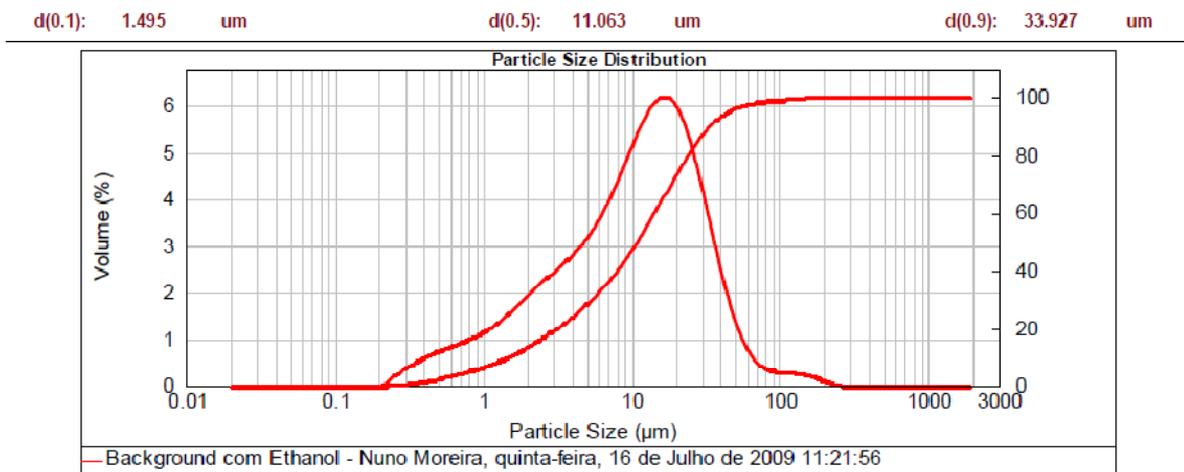


Figura 3.1 - Curva granulométrica laser do cimento usado.

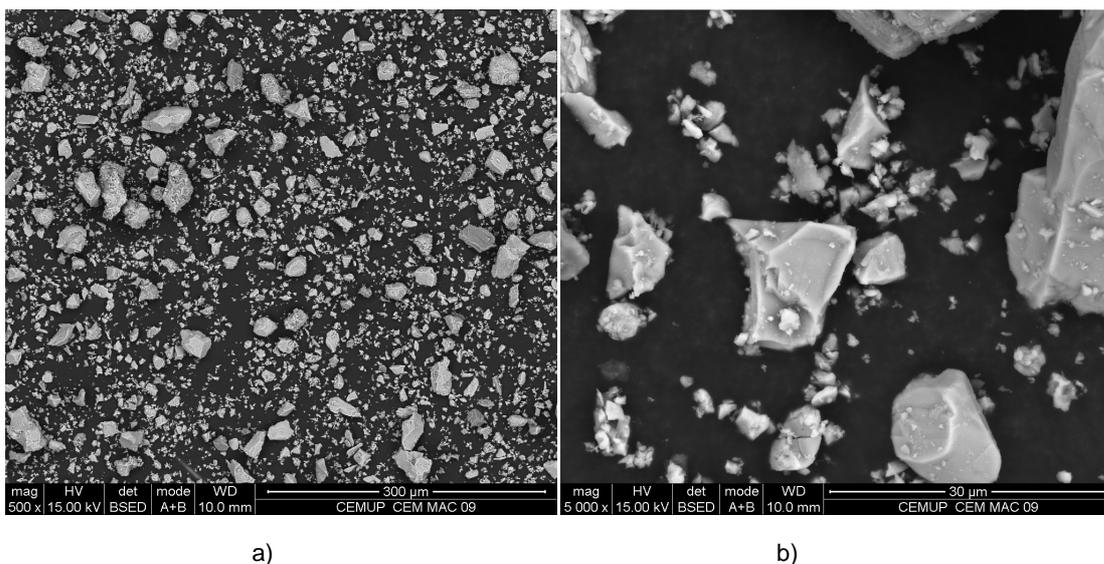


Figura 3.2 – a) Cimento no MEV ampliado 500 vezes; b) ampliado 5000 vezes.

Tabela 3.1 - Composição química do cimento utilizado (disponibilizada pela Secil).

			Mensal	Anual
Perda ao fogo	PF	%	2.61	2.43
Resíduo insolúvel	R.I.	%	1.33	1.32
Óxido de Silício	SiO ₂	%	20.36	20.39
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	%	5.1	4.76
Óxido de Ferro	FeO ₃	%	3.12	3.15
Óxido de Cálcio	CaO	%	62.72	62.17
Óxido de Magnésio	MgO	%	1.81	1.9
Sulfatos	SO ₃	%	3.44	3.44
Óxido de Potássio	K ₂ O	%	-	-
Óxido de Sódio	Na ₂ O	%	-	-
Cloretos	Cl	%	0.012	0.0137
Cal Livre		%	1.62	0.98
N/D (não doseados)		%	-	-

3.2.2. PÓ DE VIDRO

O pó de vidro (GP) tem origem portuguesa, sendo obtido numa fábrica de reciclagem de vidro em Gandra, Paredes, denominada A. J. Oliveira Cascos de Vidro, LDA. A fábrica recebe com determinada frequência resíduos de vidro proveniente de fábricas que se dedicam ao fabrico de produtos de vidro de diversas aplicações tais como janelas, vitrais, prateleiras, pavimentos em vidro, etc. e para a indústria automóvel.



Figura 3.3 - Restos de vidros de indústrias vidreiras que chegam à fábrica de reciclagem.



Figura 3.4 - Vista do sistema automático de britagem e moagem.

Depois de ser depositado num espaço próprio que existe na fábrica de reciclagem, o vidro é recolhido, e colocado num sistema quase automático onde é britado e moído acabando por ser transformado em matérias granulares de maior ou menor finura (Figura 3.5). Parte desse sistema encontra-se na Figura 3.4. Posteriormente, estes materiais são vendidos para fábricas que produzem garrafas.

Para a realização do presente estudo considerou-se apenas o resíduo de vidro mais fino, doado pelo proprietário da fábrica, que se designa, neste trabalho, por “resíduo de vidro”.



Figura 3.5 - Produto final (resíduos de vidro com diferentes dimensões, denominados também por casco).

3.2.2.1 Afiinação da moagem dos resíduos de vidro

Em primeira instância foi realizada uma análise granulométrica ao resíduo de vidro usando os peneiros da série base+série 1 de acordo com a norma NP933-1 pelo método da peneiração mecânica durante 45 minutos tendo-se utilizado uma amostra de 500 gramas. Representa-se na Figura 3.6 a curva granulométrica obtida.

Da análise da curva granulométrica constatou-se que o resíduo de vidro apresenta uma granulometria semelhante a uma areia e que seria então necessário moer o material de forma a poder considerá-lo como potencial substituto parcial do cimento com uma finura da ordem do cimento, isto é da ordem de dezenas de micra.

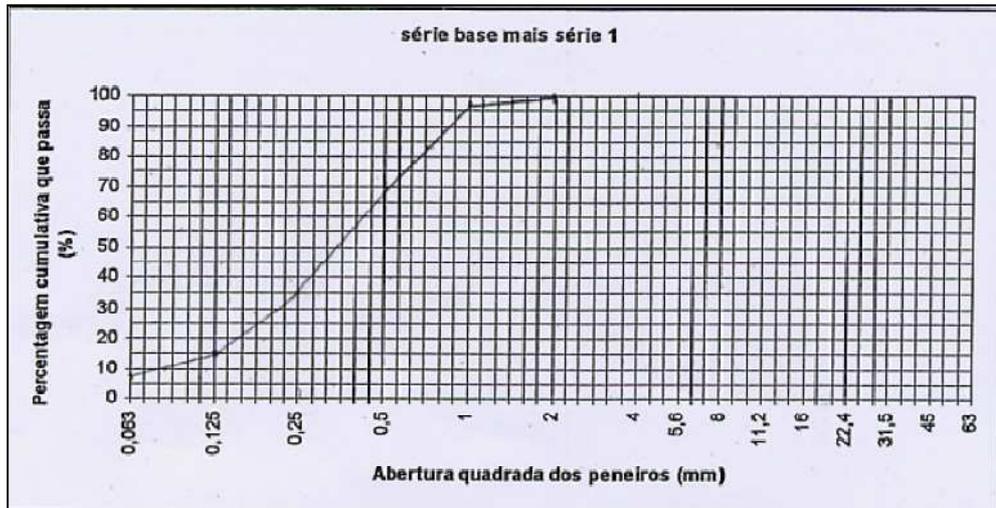


Figura 3.6 - Curva granulométrica do resíduo de vidro proveniente da fábrica.

Procedeu-se então à moagem dos resíduos num moinho de bolas usando esferas cerâmicas. Foram realizadas 3 moagens diferentes, 4 horas, 27 horas e 48 horas, sendo utilizados em cada uma destas 1.5 quilos de resíduo de vidro seco em estufa até massa constante a 100°C. Tomou-se apenas esta quantidade de material de forma a tornar o processo de moagem o mais eficaz possível.



Figura 3.7 - Moagem dos resíduos no moinho de bolas.

Em cada utilização do moinho, o respectivo tambor foi lavado com água assim como as esferas cerâmicas para se retirarem quaisquer resíduos que pudessem “contaminar” o material, sendo posteriormente limpo e seco. Efectuadas as moagens procedeu-se à análise granulométrica por difractometria laser efectuada no granulómetro laser do LABEST, apresentando-se os resultados nas Figuras 3.8 a 3.10.

Os resultados destes ensaios indicaram que o aumento do tempo de moagem conduz a um material mais fino, como seria de esperar, sendo que o resíduo de vidro moído durante 48 horas, designado doravante por GP, já apresentou uma finura semelhante à do cimento utilizado como se pode verificar na Tabela 3.2. As dimensões características das partículas de cimento e de GP, $d(0.1)$, $d(0.5)$ e $d(0.9)$ são bastante semelhantes. As curvas granulométricas destes materiais são idênticas.

Assim sendo optou-se por utilizar o GP obtido por moagem durante 48 horas, como substituto parcial do cimento no programa experimental levado a cabo. Note-se que, Glass Powder, GP, é termo internacionalmente utilizado para este tipo de material.

Tabela 3.2 - Comparação das dimensões características do cimento e do GP moído 48h.

	$d(0.1)$ (μm)	$d(0.5)$ (μm)	$d(0.9)$ (μm)
CEM I 42.5R	1.495	11.063	33.927
GP (moído 48h)	1.776	10.186	34.108



Figura 3.11 - Pó de vidro moído 48 horas.

3.2.2.2 Características do GP

Depois de escolhida a moagem a utilizar, foram realizadas análises químicas do GP, obtendo-se a seguinte composição química (Tabela 3.3). Verifica-se que o GP é maioritariamente constituído por sílica (70%), como já se sabia à partida, e o cálcio aparece como segundo componente, apresentando, assim, uma quantidade elevada de álcalis e bastante maior do que limite máximo associado a pozolanas para betão.

Tabela 3.3 - Resultados das análises químicas do GP.

Norma / P.E.	Parâmetro Analítico	Valor obtido	Incerteza	Unidades
EN 196-2	Perda ao Rubro	0,92	± 0,09	%
"	SiO ₂	70	± 8	%
311.507	Al ₂ O ₃	1,2	± 0,1	%
"	Fe ₂ O ₃	0,65	± 0,08	%
"	CaO	8,7	± 0,5	
"	MgO	3,7	± 0,4	%
"	Na ₂ O	16	± 2	%
"	K ₂ O	0,35	± 0,04	%
"	Ti ₂ O	< 0,3 ^{l.q.}	n.a.	%
"	Cr ₂ O ₃	< 0,1 ^{l.q.}	n.a.	%
EN 196-2	SO ₃	< 0,05 ^{l.q.}	n.a.	%
"	Cl	< 0,005 ^{l.q.}	n.a.	%

A pozolanicidade é determinada comparando a concentração de íão cálcio, expresso em óxido de cálcio, presente na solução aquosa em contacto com o cimento hidratado, depois de um período de tempo determinado, com a quantidade de íão cálcio que faz saturar uma solução da mesma alcalinidade. O cimento satisfaz o ensaio, isto é, dá um resultado positivo, se a concentração de íão cálcio na solução for inferior à concentração de saturação. Realizou o ensaio da pozolanicidade, numa amostra com 90% de cimento e 10% de GP, de acordo com a norma NP EN 196-5, e cujo resultado foi positivo como se mostra na Figura 3.12.

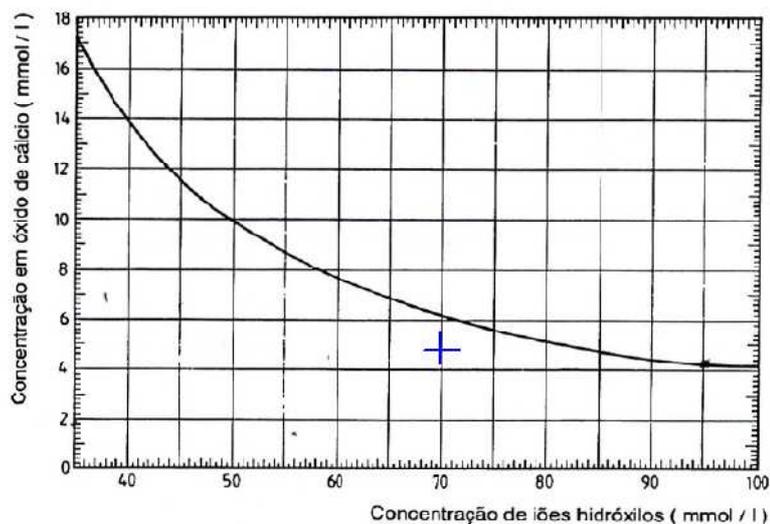


Figura 3.12 - Resultado do Ensaio da Pozolanicidade.

3.2.3. SÍLICA DE FUMO

A sílica de fumo é um subproduto da preparação do metal silício ou de ligas de silício, especialmente de ferro-silício, em fornos eléctricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão, a elevadas temperaturas (cerca de 2000° C). As matérias-primas introduzidas no forno para fabrico do silício são constituídas por quartzo, carvão e pedaços de madeira. As reacções químicas que têm lugar são complexas, mas uma delas envolve a formação de um gás – monóxido de silício (SiO), que se oxida formando SiO₂ e condensa em pequenas esferas de sílica amorfa. Estas partículas são arrastadas nos gases de escape e captadas em filtros de saco, antes da sua saída para a atmosfera, obtendo-se assim a designada sílica de fumo ou microssílica (Coutinho, 2002). A ficha técnica da sílica de fumo utilizada encontra-se no Anexo.

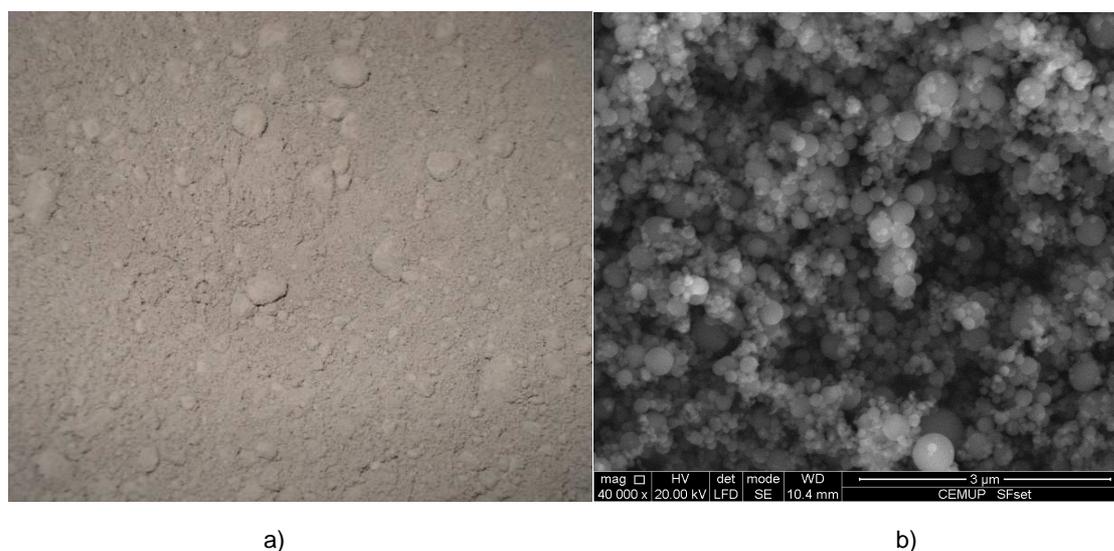


Figura 3.13 – a) Sílica de fumo utilizada; b) Sílica de fumo ampliada 40000 vezes no MEV.

3.2.4. AREIA NORMALIZADA CEN

Durante a produção das argamassas foi utilizada uma areia normalizada CEN, certificada segundo a norma NP EN 196-1 (1996), controlada pelo Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris. Consiste numa areia natural, com grãos de forma arredondada em que o seu teor em sílica é pelo menos igual a 98%, estando os limites da sua fracção granulométrica compreendidos na tabela a seguir apresentada (NP EN 196-1).

Tabela 3.4 - Granulometria da areia Normal (NP EN 196-1).

Abertura do Peneiro (mm)	Resíduos acumulados (%)
2.00	0
1.60	7±5
1.00	33±5
0.50	67±5
0.16	87±5
0.08	99±1

3.2.5 SUPERPLASTIFICANTE SIKA VISCOCRETE 3008

Sika ViscoCrete 3008 é um adjuvante superplastificante/forte redutor de água para betão de acordo com a norma EN 934-2.

3.3 ENSAIOS NAS ARGAMASSAS

3.3.1. COMPOSIÇÃO E FABRICO DOS PROVETES

Após preparação da adição sucedeu-se o fabrico dos provetes de argamassa para realização dos ensaios citados anteriormente. A relação água/cimento (w/c) foi mantida constante para as diferentes argamassas tendo sido necessário considerar o uso de um adjuvante superplastificante (SP) para manter a trabalhabilidade apenas para as argamassas com substituição de cimento por sílica de fumo. A tabela seguinte apresenta as quantidades dos materiais utilizados na produção dos provetes de argamassa.

Tabela 3.5 - Composição dos provetes de argamassa.

Componente	CTL	SF10	GP10	GP20
Cimento (g)	450	405	405	360
SF (g)	0	45	0	0
GP (g)	0	0	45	90
Areia (g)	1350	1350	1350	1350
Água (ml)	225	225	225	225
Super Plastificante (g)	0	1,52	0	0
Razão w/c	0.5	0.5	0.5	0.5
Razão SP/c		0.0034		

O procedimento de produção dos provetes foi baseado na norma NP EN 196-1. A amassadura foi realizada mecanicamente, num misturador com dimensões e características especificadas na norma e segundo o procedimento determinado. Excepto no que concerne ao tempo de mistura das argamassas SF que totalizou 7 minutos em vez dos 4 normalizados, para garantir uma completa homogeneização e mistura do superplastificante aumentando os 60 segundos finais de movimento rápido em 180 segundos

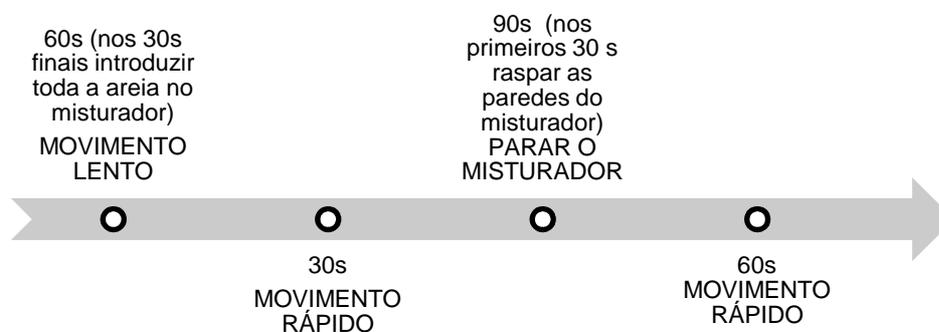


Figura 3.14 - Amassadura de uma argamassa normalizada.



Figura 3.15 – Misturador do LEMC.



Figura 3.16 - Compactação (60 pancadas num minuto).

De modo a economizar argamassa alguns provetes de ensaios distintos (cloretos e ASR) foram produzidos a partir de uma mistura de duas amassaduras seguidas. Nestes casos o procedimento foi o seguinte, primeiro realizou-se uma amassadura que foi posta de parte num recipiente enquanto se produzia a segunda. Preparada a segunda, a primeira foi introduzida no misturador e partir daí contou-se 1 minuto para a homogeneização das duas amassaduras em movimento rápido. Realizou-se o ensaio de trabalhabilidade com a mistura.

Após a amassadura a argamassa foi colocada em moldes onde foi compactada em duas camadas num compactador ou manualmente conforme o ensaio a realizar e a respectiva normalização desse ensaio. Durante um período de 24 ± 2 horas de acordo com a Norma NP EN 196-1, a argamassa permaneceu nos moldes.

Após este período, os provetes foram desmoldados e submersos em água no interior da câmara de cura a $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ até a data de realização dos ensaios.

3.3.2 AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade consiste na maior ou menor facilidade de execução do betão (transporte, colocação, compactação e acabamento) e a menor ou maior facilidade de segregação durante essas operações (Coutinho, 2002).

O ensaio de trabalhabilidade das argamassas, seguiu o procedimento descrito pelas normas americanas ASTM C 190/90 a ASTM 230. A argamassa normalizada foi colocada num molde tronco-cónico em duas camadas compactando cada uma com 20 pancadas. Em seguida submeteu-se o molde a 25 pancadas durante 15 segundos e depois mediram-se 3 diâmetros de espalhamento das argamassas cuja média se designa por trabalhabilidade.



Figura 3.17 - Medição da trabalhabilidade.

De modo a verificar se a trabalhabilidade das argamassas com SF e GP era da mesma ordem de grandeza da trabalhabilidade do controlo, foi em primeiro lugar, realizada uma amassadura de controlo tendo-se determinado o diâmetro de espalhamento médio. Este valor foi considerado como diâmetro de espalhamento padrão e verificou-se se nas amassaduras, com substituição parcial de cimento, o diâmetro de espalhamento se encontrava no intervalo admissível $[200.0 \pm 10]$ mm. As argamassas com GP verificaram a condição e apresentavam maior trabalhabilidade do que o CTL. No que se refere à SF foi necessário acertar a sua trabalhabilidade já que esta se encontrava distante do intervalo permitido, 200 ± 10 mm. Foram realizadas amassaduras até obter um diâmetro de espalhamento admissível, que se atingiu adicionando 4.33g de superplastificante.

Tabela 3.6 - Trabalhabilidades das argamassas numa das amassaduras realizada.

Argamassas	Diâmetros (mm)			Média	Desvio Padrão
CTL	199	200	200	200	0.58
GP10	205	204	206	205	1.00
GP20	205	205	206	205	0.58
SF10	197	197	196	197	0.58

3.3.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA

Para calcular a composição de um betão, para determinar a superfície específica de um cimento e por vezes, para verificar se o cimento está já parcialmente hidratado é necessário determinar a sua massa volúmica. De facto o conhecimento desta grandeza também permite detectar a existência de material inerte no cimento Portland pois, um valor da massa volúmica inferior a $3,05 \text{ g/cm}^3$ indica mal cozido, ou ainda parcialmente hidratado (Coutinho, 1988). Isto refere-se apenas ao CEM I (pelo menos 95% de clínquer Portland) e não a CEM's com adições (CEM II, CEM III e CEMIV) que apresentam menor massa volúmica relativamente ao cimento Portland tradicional uma vez que as adições neles incorporadas apresentam menor massa volúmica o que por conseguinte, diminui a massa volúmica do

cimento podendo obter-se valores inferiores ao limite acima referido. Neste caso, como foi usado um CEM I, teria de respeitar o mínimo exigido.

A massa volúmica é determinada pela maneira usual para qualquer sólido, conhecendo a massa e medindo o seu volume a partir do deslocamento de um líquido num voluménmetro apropriado, designado incorrectamente por “densímetro”, de Le Châtelier

A massa volúmica do cimento, da SF e do GP foram determinadas segundo a Especificação E-64 do LNEC, especificação que está de acordo com a EN 196-6. Tomaram-se 100 gramas de cimento, de SF e de GP, colocaram-se na estufa a cerca de 105°C até massa constante. De acordo com a norma seguida, são usadas apenas 65 gramas de cimento para realizar o ensaio. Num primeiro ensaio foram também usadas 65 gramas de SF e de GP, porém verificou-se que com essa quantidade a capacidade de medição do voluménmetro era ultrapassada devido à menor massa volúmica destas pozolanas, pelo que foi realizado mais um ensaio em que se gastaram 50 gramas de GP e 40 gramas de SF.

Encheu-se um recipiente com água e colocou-se na câmara húmida do LEMC, que se encontra a 20.0°C, e esperou-se que esta atingisse uma temperatura de 20±0.2°C, fazendo verificações periódicas de temperatura com a ajuda de um termómetro digital. Enquanto isso encheram-se os voluménmetros com petróleo (líquido auxiliar) com o apoio de um funil de tubo longo, até um nível compreendido entre as graduações zero e um da escala.

Encontrando-se a água à temperatura ideal de ensaio foi retirada da câmara e colocaram-se três voluménmetro com petróleo dentro do recipiente, esperando-se algum tempo para permitir que o petróleo atingisse a temperatura de 20°C. Retirou-se um voluménmetro de cada vez e verteu-se o respectivo material neste cuidadosamente, quase partícula a partícula, evitando que estas aderissem às paredes do aparelho e a acumulação excessiva no estrangulamento. De referir que o ensaio não foi realizado dentro da própria câmara húmida uma vez que a temperatura do LEMC rondava os 20°C, já que o ensaio foi realizado em Março.

Durante a colocação do material, o voluménmetro foi movimentando para favorecer a libertação das bolhas de ar, assim como após todo o material estar vertido. Foi colocado novamente no recipiente de água. Este procedimento foi repetido para a SF e GP.

A massa volúmica do provete, em gramas por centímetro cúbico, é expressa pela equação

$$\frac{m}{V_2 - V_1} \quad (3.1)$$

Em que:

m é a massa do provete seco, em gramas;

V₁ é o valor lido no voluménmetro contendo somente o petróleo, em centímetros cúbicos;

V₂ é o valor lido no voluménmetro contendo o petróleo e o provete, em centímetros cúbicos;

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.7. Verificou-se ser a SF apresenta a menor massa volúmica, seguindo-se o GP e depois o cimento.

Tabela 3.7 - Massas volúmicas determinadas para o cimento, SF e GP.

Material	Massa (g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	Massa volúmica (g/cm ³)	Gama de valores da Literatura
CEM I 42.5R	65	0,45	21,00	3,16	>3,05
SF	40	0,11	18,30	2,20	2,20 ⁽¹⁾
GP	50	0,35	19,00	2,68	2,47-2,52 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Chan & Chu (2004) – 2.20

⁽²⁾ Shi et al. (2005), Zhi et al. – 2,47; Shwartz et al. (2008), Jaian & Neithalath – 2,49; Taha & Nounu (2008) – 2,51.

3.3.4. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PRESA

Distinguem-se em geral dois períodos para o tempo de presa: início e fim. O primeiro é o tempo decorrido entre a amassadura e a perda da plasticidade, e o fim de presa é o tempo necessário para que a pasta adquira a firmeza suficiente para resistir a uma certa pressão.

Durante um período inicial designado por período dormente ou de indução, após a amassadura de água e cimento, a fluidez ou consistência de pasta mantém-se relativamente constante e embora se verifique a perda gradual de fluidez é possível recuperá-la se se reamassar a pasta.

Em geral 2 a 4 horas depois da amassadura, a temperaturas normais, a mistura começa a ganhar rigidez muito rapidamente e considera-se que atingiu o início de presa. No entanto, a resistência é ainda muito baixa e o endurecimento só começa após o fim de presa que ocorre umas horas depois.

Tabela 3.8 - Tempos de inicio e fim de presa.

Pastas	w/c	Consistência Normal (mm)	Tempo de Inicio de Presa	Tempo de Fim de Presa
CTL	0,28	8	2h30m	3h20m(+15m)
GP 10	0,29	7	2h20m	3h10m(+15m)
GP 20	0,30	8	2h15m	3h10m(+15m)

Os tempos de presa dos GP's não diferem muito do controlo, apenas ocorrem 10 e 15 minutos mais cedo. Como é possível observar ao tempo de fim de presa, que corresponde ao tempo em que a agulha penetrou menos de 0,5mm (ou seja, deixou de se observar na pasta a marca do anel), foram acrescentados mais 15 minutos. Isto deve-se ao facto do anel se localizar a 1 mm do extremo da agulha e não a 0,5 mm que seria o correcto, por isso foi aconselhado acrescentar este tempo segundo os técnicos do LEMC.



a)



b)

Figura 3.18 – a) Medição do tempo de fim de presa com o aparelho de Vicat; b) Marcas da agulha com anel no provete para medição do tempo de fim de presa.

3.3.5. EXPANSIBILIDADE

A pasta de cimento, após a presa, não deve sofrer grandes variações de volume, principalmente expansões. As expansões, se impedidas, podem causar a destruição do material. Este tipo de expansões pode ser causado por hidratação retardada ou lenta (ou outras reacções) de alguns compostos presentes na pasta como óxido de cálcio livre, óxido de magnésio e sulfato de cálcio (Coutinho, 2002). O ensaio realizado permite detectar a expansibilidade do óxido de cálcio livre.



a)



b)

Figura 3.19 – a) Provetes imersos em água em ebulição. b) Provetes à temperatura ambiente, após ter estado em água em ebulição 3 horas.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.9, todos abaixo do recomendado pela normalização para ligantes (NP EN 197-1) de 10mm. O GP20 foi o que apresentou a expansão mais desfavorável e o GP 10 praticamente não expandiu, ficando o CTL no intermédio destes.

Tabela 3.9 - Expansibilidade das pastas em milímetros.

Pastas	A	B	C	C-A
CTL	24,70	25,85	24,58	0,12
GP 10	14,10	14,06	14,07	0,03
GP 20	14,13	14,43	14,43	0,30

As medidas A, B e C correspondem à distância entre as extremidades das agulhas do molde, cuja precisão exigida na sua medição é 0,5mm. Neste caso a medição foi realizada com maior precisão pois a craveira usada assim o permitiu.

3.3.6. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

A resistência mecânica do cimento é a propriedade mais importante em termos de utilização estrutural pelo que todas as normas fixam valores mínimos desta característica (Neville, 1995).

A resistência à compressão é obtida em provetes equivalentes a cubos de 40mm de aresta que provem de prismas 40x40x160 mm (três para cada idade para a qual se pretende determinar a resistência mecânica) que são inicialmente ensaiados à flexão de modo a obter-se os meios prismas.

O ensaio de resistências mecânicas foi realizado de acordo com a NP EN 196-1 para as idades de 7, 28, 90 e 180 dias para cada espécie de argamassa. Os provetes foram conservados nos moldes durante 24 horas e depois de desmoldados foram imediatamente colocados dentro de água na câmara húmida do LEMC até ao momento dos ensaios de resistência. Na data de ensaio, os provetes foram retirados do seu meio de conservação e ensaiados à flexão, resultando cada provete em dois meios prismas. Cada meio prisma foi então submetido ao ensaio de resistência à compressão.



Figura 3.20 – Provetes prismáticos (40x40x160mm).



Figura 3.21 - Ensaio de resistência, flexão (a) e compressão (b).

O resultado da resistência à compressão para cada grupo de argamassa obteve-se fazendo a média aritmética de seis resultados individuais, obtidos a partir das seis determinações, efectuadas numa série de três prismas.

Para o resultado do ensaio de resistência à flexão calculou-se a média aritmética de três resultados individuais correspondentes aos três prismas.

Os resultados obtidos deste ensaio encontram-se nas Figuras 3.22 e 3.23, e todos os resultados numéricos podem ser consultados no Anexo.

Como se pode verificar a resistência à flexão é ligeiramente superior nas argamassas CTL aos 7,28 e 90 dias, embora nesta última idade todas elas estejam bastante próximas. Para uma idade de 180 dias a resistência à flexão é maior nos provetes de GP relativamente aos restantes.

No que se refere à resistência à compressão, aos 7 e 28 dias tem maior valor nos provetes de CTL. Com 90 dias de idade, as argamassas com adição de SF apresentam a maior resistência seguindo-se o GP20. Aos 180 dias de idade a continua a SF em primeiro lugar seguindo-se o CTL.

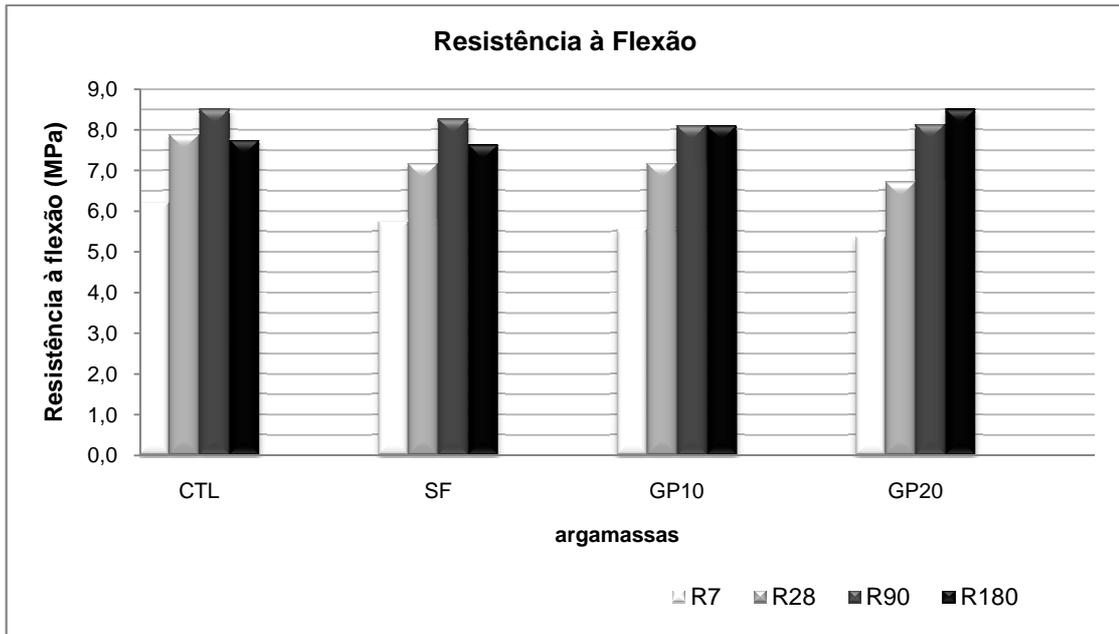


Figura 3.22 - Resistência à flexão nas argamassas aos 7, 28, 90 e 180 dias.

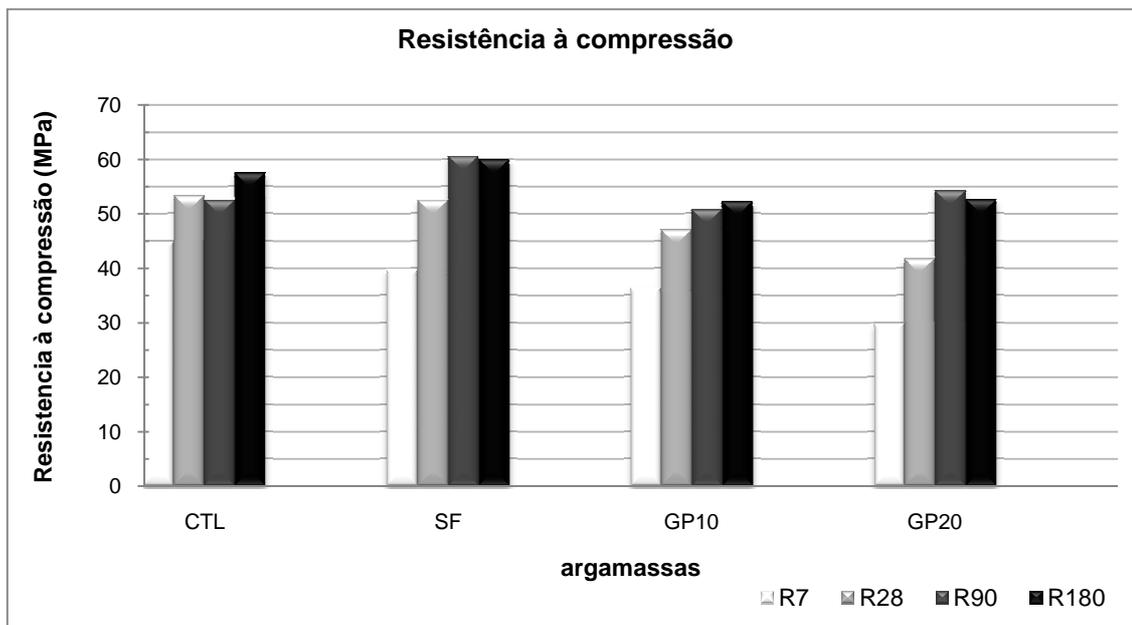


Figura 3.23 - Resistência à compressão nas argamassas aos 7, 28, 90 e 180 dias de idade.

3.3.7. CARBONATAÇÃO ACELERADA

Uma das reacções químicas no betão que afectam a durabilidade pondo em risco as armaduras (betão armado ou pré-esforçado) é a carbonatação, reacção entre os compostos cálcicos do betão com o dióxido de carbono. A carbonatação tem como consequência uma diminuição da alcalinidade do betão. O pH do betão inalterado é de cerca de 12-13, valor devido sobretudo à forte alcalinidade do hidróxido de cálcio, mas quando se dá a carbonatação o valor do pH pode ser inferior a 9. A carbonatação é assim causada pela entrada de dióxido de carbono do ar através dos poros para o interior do betão que reage com o hidróxido de cálcio produzindo-se carbonato de cálcio cujo pH é muito inferior.

No caso de a carbonatação progredir atingindo o betão envolvente das armaduras, estas até aqui passivas, ficarão susceptíveis de corrosão.

Com isto, abre-se a possibilidade de corrosão das armaduras, tendo por consequência a redução da secção do aço e destacamentos do betão de recobrimento.

A determinação da resistência à carbonatação foi baseada na norma E-391. Foi analisado um provete com dimensões 40x40x160mm de cada argamassa. A câmara apresenta uma humidade relativa (HR) de 65%, sendo a temperatura aproximadamente 20°C, com uma concentração de CO₂ de 5%. Estes parâmetros são controlados por sensores localizados no interior do aparelho.

As amostras permaneceram em cura húmida por cerca de 2 meses. Após este período, os provetes foram introduzidos na câmara de carbonatação acelerada com uma das faces 40x40mm assentes na base da câmara, faces estas que foram identificadas para que fosse cortada a face oposta. Após permanecerem aproximadamente 2 meses na câmara, cortou-se de cada provete, uma fatia de cerca de 1 cm de espessura e depois pulverizou-se as suas secções rectangulares com solução de fenolftaleína. A fenolftaleína apresenta cor rosa forte nas zonas isentas de carbonatação (pH elevado) mantendo-se incolor nas zonas que foram afectadas por esta (pH baixo). Voltou-se a repetir a operação 2 meses depois.

O ensaio da carbonatação é de certa forma um ensaio mais quantitativo do que qualitativo, mas para uma melhor comparação numérica de resultados a profundidade de carbonatação, foi medida em todas as arestas de cada provete em três pontos distintos com a ajuda de uma craveira, depois foi calculada uma média dessas profundidades para cada espécie de argamassa, estando os resultados apresentados nas Tabela 3.10 e na Figura 3.26.

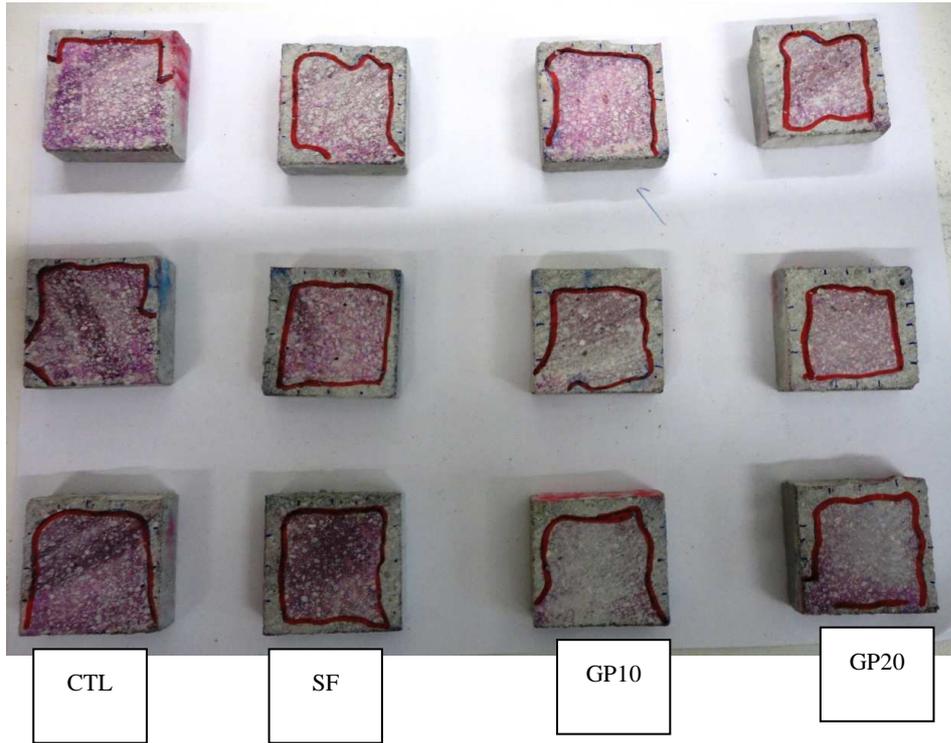


Figura 3.24 - Carbonatação ao fim de cerca de 2 meses.

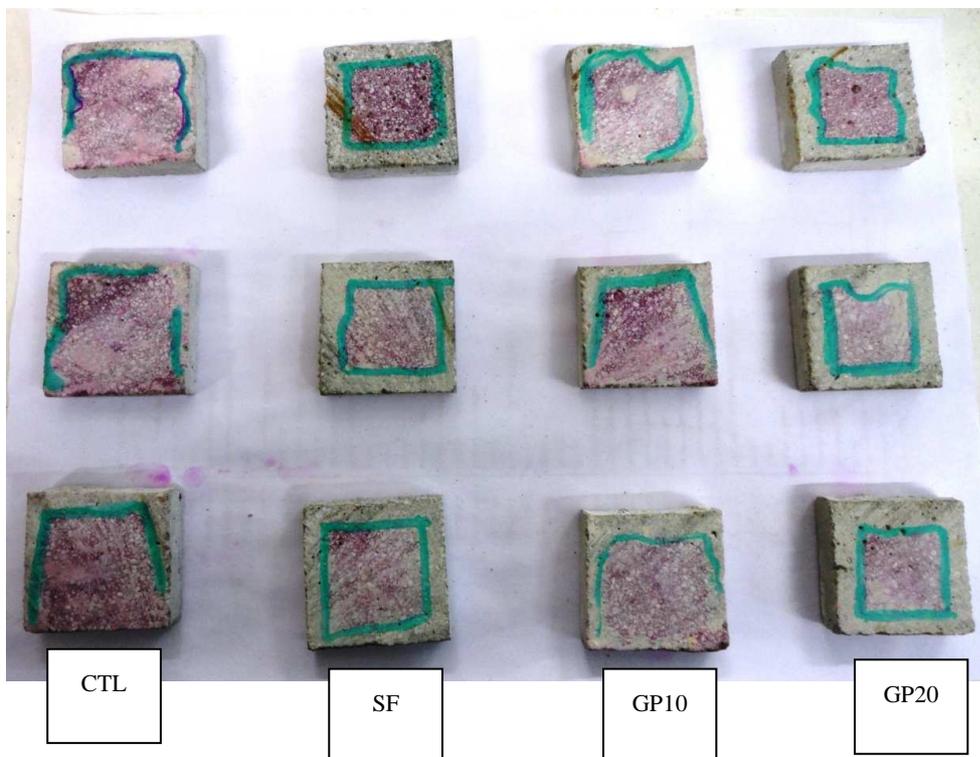


Figura 3.25 - Carbonatação ao fim de cerca de 4 meses.

Tabela 3.10 - Profundidade carbonatada da cada espécie de argamassas.

	Profundidade Média 2 meses (mm)	Desvio padrão	Profundidade Média 4 meses (mm)	Desvio padrão
CTL	1,303	0,150	3,009	2,624
SF	3,290	0,204	7,245	1,207
GP10	3,203	0,210	4,911	2,942
GP20	3,317	0,210	7,941	1,549

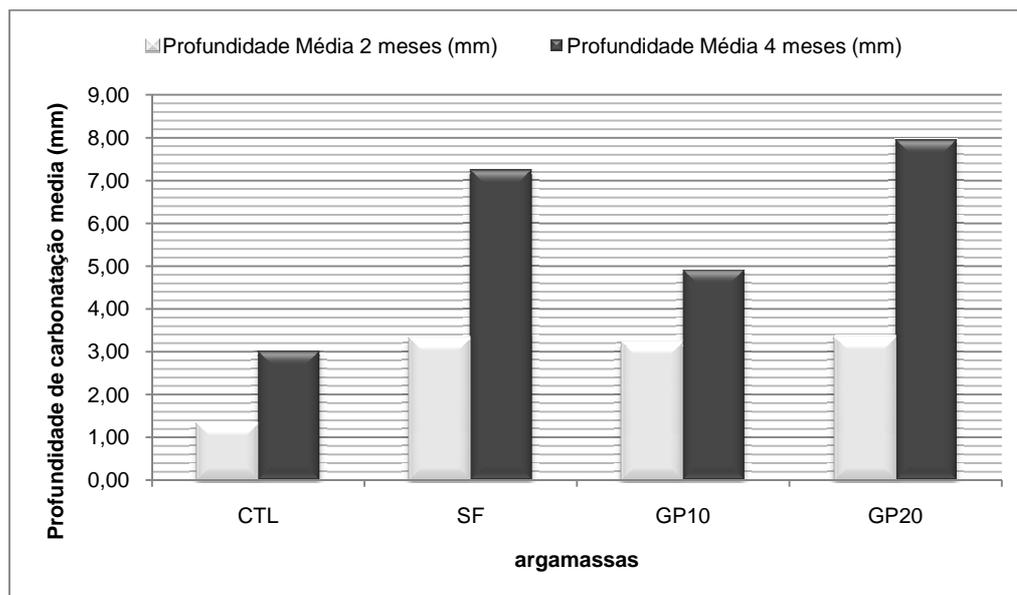


Figura 3.26 - Profundidade de carbonatação média das argamassas.

A carbonatação foi menor nos provetes de controlo em todas as idades. As argamassas com pozolanas tiveram profundidades de carbonatação médias semelhantes após 2 meses na câmara de carbonatação acelerada. Passados cerca de quatro meses na câmara, a carbonatação foi bastante agravada nas argamassas SF e GP20 aumentando para mais do dobro, sofrendo também as restantes um ligeiro aumento na profundidade.

3.3.8. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Com o intuito de se avaliar a influência dos resíduos utilizados como adições na durabilidade do betão, tem grande importância a consideração da facilidade com que a água penetra pelos seus poros e fendas. A água é o principal meio de transporte de substâncias nocivas ao betão. Com isto, torna-se importante a avaliação da absorção de água por capilaridade.

A absorção de água por capilaridade é um dos principais mecanismos de penetração de água através do betão de recobrimento. A água, além de poder ser nociva à estrutura alimentando o fenómeno de corrosão, funciona também como meio de transporte de agentes agressivos nela dissolvidos. A absorção é definida como a entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares, que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos

poros capilares, sendo dependente do diâmetro capilar. Assim sendo, quanto menor for o coeficiente de absorção do material, mais protegida estará a estrutura.

Constata-se que depois da absorção relativamente rápida dos poros facilmente acessíveis dá-se o enchimento, muito lento, dos macroporos. Considerando a primeira fase do ensaio a até ser atingida a saturação dos poros livremente acessíveis, a curva será constituída por troços lineares correspondentes às famílias de poros que intervêm no processo de absorção capilar. O declive de cada troço resultará do enchimento da família mais representativa e enchimento parcial das famílias de poros de menor importância.

O ensaio de absorção capilar foi realizado de acordo com a especificação E-393 do LNEC na parte aplicável e recomendação da RILEM TC 116-PCD, também na parte aplicável. Foram, para este efeito, necessários 3 provetes cilíndricos, com um diâmetro de 100mm, e 50mm de altura, que após terem sido fabricados, foram transferidos para uma câmara húmida, estando imersos em água, durante 2 meses, no final dos quais, se colocaram numa estufa a 40°C até que apresentassem massa constante (diferença do peso dos provetes, entre duas medições espaçadas de 24h inferior a 0,10%). Em cerca de 2 semanas os provetes atingiram massa constante. Foram então retirados da estufa e colocados a arrefecer na sala onde se iria realizar o ensaio durante 24 horas, de modo a ambientarem-se com a temperatura desta, como sugerido na recomendação RILEM. Na véspera foi preparado todo o sistema de ensaio, que se encontra representado na Figura 3.26, nomeadamente, colocação da grelha; colocação de provetes de teste (ou seja provetes próprios para testar o equipamento) para prever o local de cada provete e de modo a que a superfície inferior do provete estivesse em contacto com a água, com uma altura de água de 3 ± 1 mm a contar da base do provete; a regulação da torneira que permite a entrada da água no reservatório onde se encontram os provetes a ensaiar através do nível da água e do caudal de saída.

No dia do ensaio, retiraram-se os provetes de teste e colocaram-se os provetes a ensaiar, já pesados, retirando e colocando um por um. Durante o ensaio, que neste caso foi de 24 horas, os provetes foram pesados em intervalos de tempo crescentes, em horas determinadas. Procurou-se que a secagem de cada provete, anterior à sua pesagem, fosse apenas da água superficial, o que foi conseguido pousando o provete sucessivamente 3 vezes em locais diferentes num pano húmido estendido perto da balança.

A partir dos dados referidos foi possível definir os valores da absorção por unidade de área da superfície do provete em contacto com a água e os correspondentes valores de raiz de tempo.

Como a curva de absorção é quase linear nas primeiras horas de ensaio, torna-se adequado utilizar o coeficiente de absorção, S correspondente ao gradiente da recta obtida por regressão linear à curva de absorção, para analisar a cinética da absorção por capilaridade.

$$A = a_0 + S \cdot t^{0.5} \quad (3.2)$$

Em que:

A – Absorção de água por unidade de superfície do betão (mg/mm^2)

S – Coeficiente de absorção do material ($\text{mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$)

t – Tempo passado desde do instante inicial (minutos)

a_0 – Água inicialmente absorvida pelos poros em contacto com a água (mg/mm^2)

Os coeficientes de absorção foram calculados a partir das curvas de absorção considerando as primeiras 4h30m de ensaio.

As curvas de absorção obtidas com este tipo de argamassas, de acordo com uma substituição de cimento de 10 e 20%, estão representadas na Figura 3.28, e os seus correspondentes coeficientes de absorção também indicados no próprio gráfico e na tabela seguinte.

Tabela 3.11 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade.

	Coeficiente de absorção	Média	Desvio Padrão
CTL 1	0,0631		
CTL 2	0,0351	0,0477	0,01422
CTL 2	0,0448		
SF1	0,0395		
SF2	0,0398	0,0395	0,00035
SF3	0,0391		
GP10-1	0,0487		
GP10-2	0,0491	0,0471	0,00318
GP10-3	0,0434		
GP20-1	0,0501		
GP20-2	0,0434	0,0480	0,00399
GP20-3	0,0505		

Como é perceptível, a absorção de água por capilaridade é bastante semelhante nas argamassas ensaiadas, estando as rectas de absorção-tempo muito próximas umas das outras. Relativamente ao coeficiente de absorção, também é bastante semelhante nos provetes de CTL e GP's, sendo a SF que apresenta o menor, ligeiramente inferior aos anteriores.

Deve-se frisar também, que os resultados obtidos para a argamassa CTL são bastante dispersos, e pensa-se que isto pode dever-se à má colocação do molde no compactador (já que este é muito pesado, pois é composto por aço e tem grande dimensão), originando assim uma compactação não uniforme dos três provetes. Sugere-se a repetição deste ensaio para a argamassa CTL.

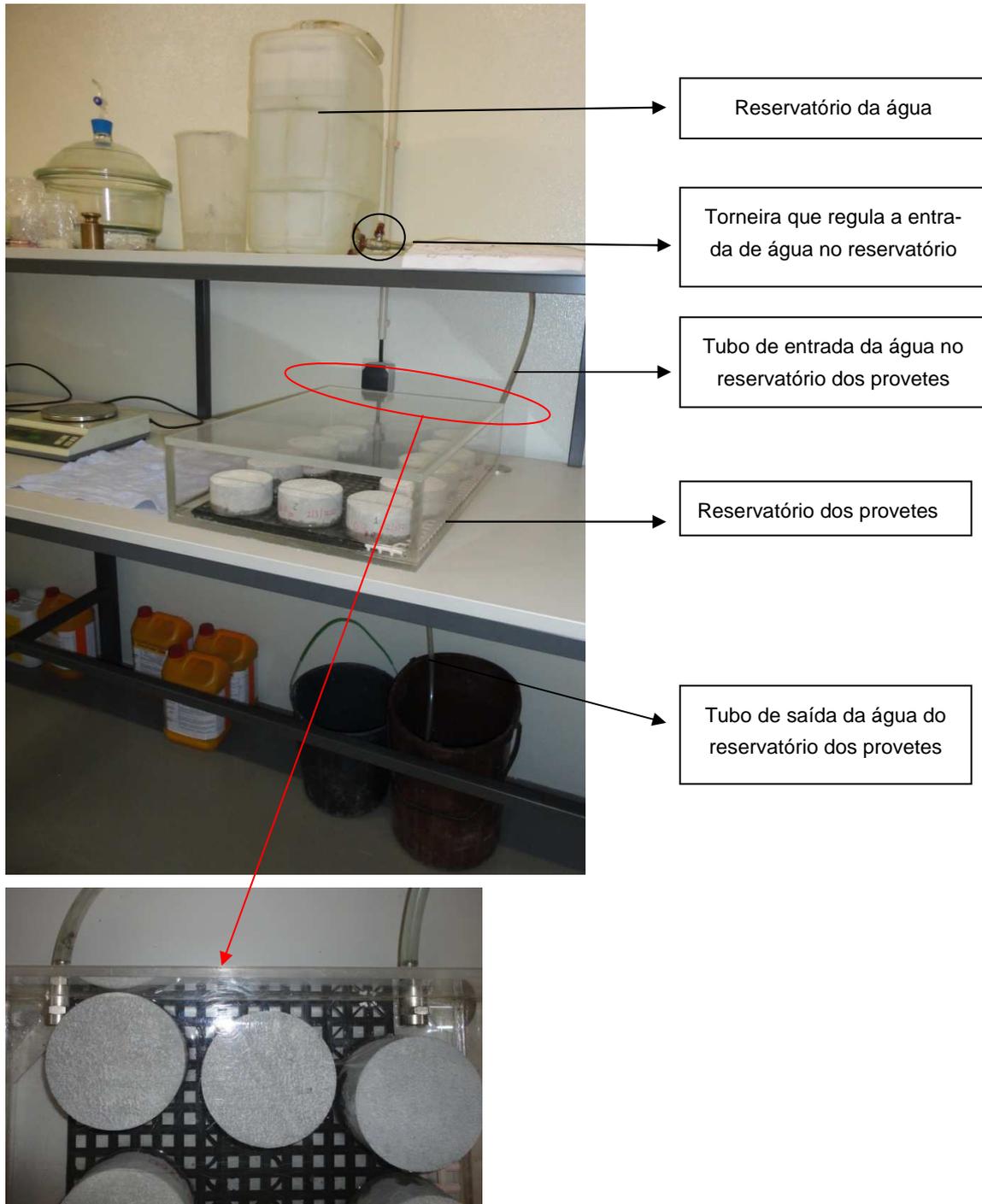


Figura 3.27 - Esquema do ensaio de capilaridade e pormenor da entrada e saída da água no reservatório dos provetes.

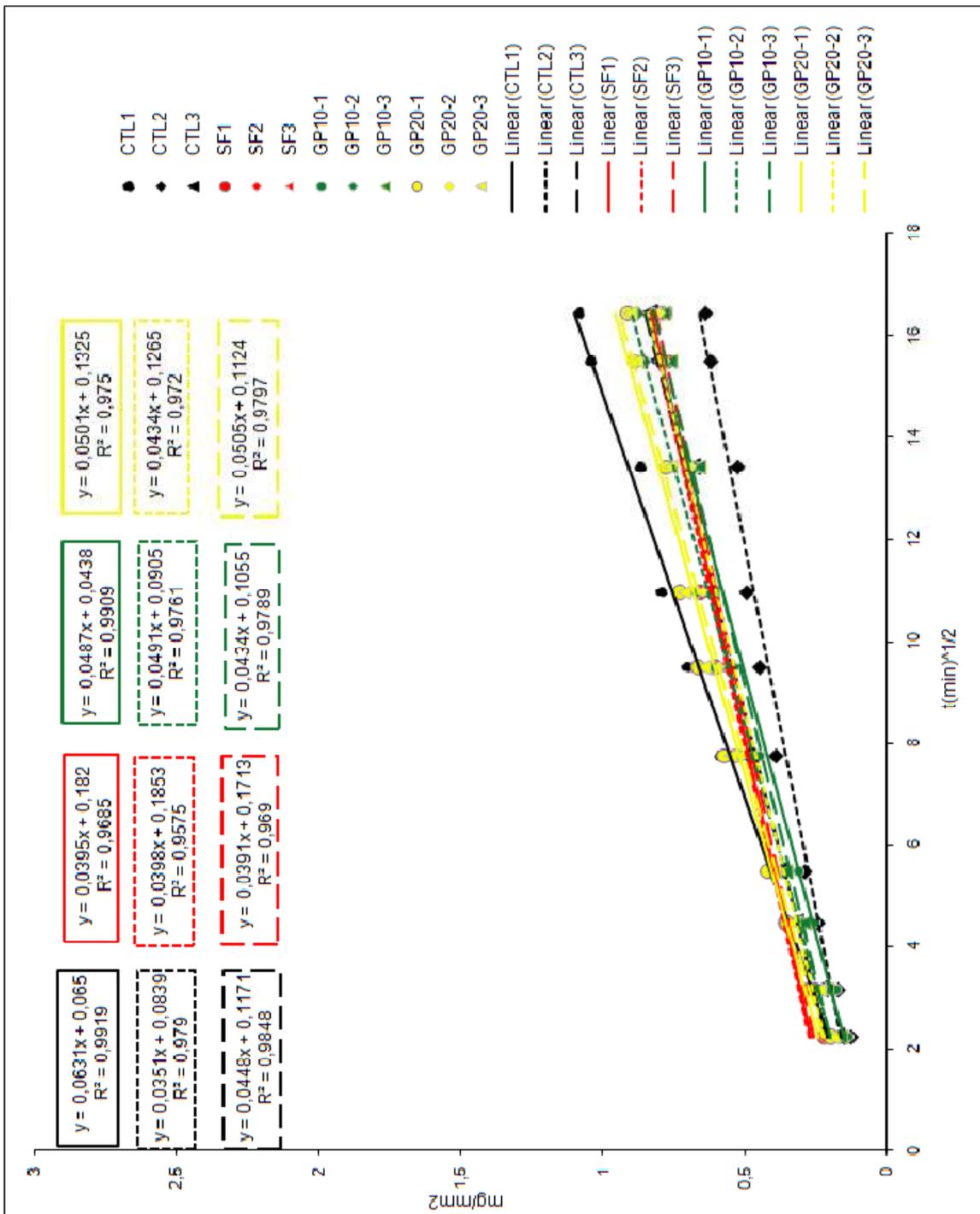


Figura 3.28 - Rectas de absorção-tempo (4h30m).

3.3.9. PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS

Os cloretos alteram o tempo de presa do cimento e a velocidade do endurecimento, mas não são perigosos para o betão simples pois não formam compostos indesejáveis com os componentes do cimento, mesmo em doses muito elevadas. Mas no caso do betão armado ou pré-esforçado, isto é, com armaduras, então já é importante a presença de cloretos. Os cloretos promovem a sua oxidação sob a forma de ferrugem provocando não só a diminuição da sua secção, mas também expansão, pois como se sabe a formação da ferrugem faz-se com um notável aumento de volume, que acaba por romper o revestimento do betão, o que acelera mais ainda o processo de corrosão.

Seguiu-se a especificação do LNEC E-463 para avaliar a penetração (acelerada) de cloretos. Utilizaram-se 12 provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura: três provetes relativos a cada argamassa, CTL, SF, GP10 e GP20, que foram moldados, de acordo com a norma NP EN 196-. Conforme o preconizado por aquela especificação, submeteu-se cada provete, entre as faces circulares (direcção pela qual se dá a penetração dos cloretos) a um potencial eléctrico externo, o que faz com que os iões cloro externos (provenientes de uma solução de NaCl (cloreto de sódio), inicialmente apenas em contacto com a superfície do provete, migrem para o interior do provete.

Os moldes foram previamente oleados apenas lateralmente na superfície cilíndrica e de modo a evitar que o óleo desmoldante bloqueasse a entrada de cloretos nos poros da argamassa, foi colocado acetato na parte inferior do molde. A compactação foi realizada pelo compactador mecânico, 60 pancadas num minuto, em duas camadas. A compactação dos provetes não foi perfeita certamente devido ao peso bastante elevado do molde, o que provavelmente se reflectiu nos resultados da penetração de cloretos. Decorridas 24 horas os provetes foram desmoldados e colocados em água na câmara húmida do LEMC até à realização do ensaio.

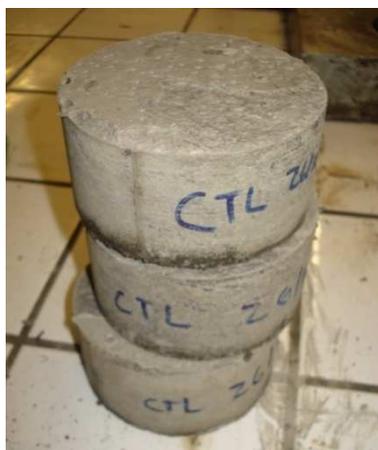


Figura 3.29 - Provetes cilíndricos de CTL.

Na véspera da realização do ensaio os provetes foram retirados do seu local de acondicionamento, limpou-se o excesso de água e colocaram-se na câmara de vácuo a uma pressão de acordo com a especificação do LNEC durante uma hora. Com a bomba de vácuo em funcionamento, permitiu-se o enchimento do recipiente com uma solução saturada de hidróxido de cálcio, ficando todos os provetes imersos, permanecendo mais três horas em vácuo. Terminado o tempo, desligou-se a bomba e os provetes ficaram imersos na solução cerca de $18h \pm 2$ horas.

Aplicou-se, com um depósito de NaCl em contacto com uma das faces do provete, e uma solução de NaOH em contacto com a outra face do provete, um potencial eléctrico, o que forçou, por migração, o transporte dos iões cloreto na argamassa (Figura 3.30 a)). No caso corrente a voltagem aplicada foi de 30V e o tempo de ensaio foi de 24 horas para as argamassas de CTL e GP10 e 60V com duração de 48 horas para as argamassas de SF e GP20, valores de acordo com as intensidades de corrente lidas inicialmente e segundo a especificação do LNEC.

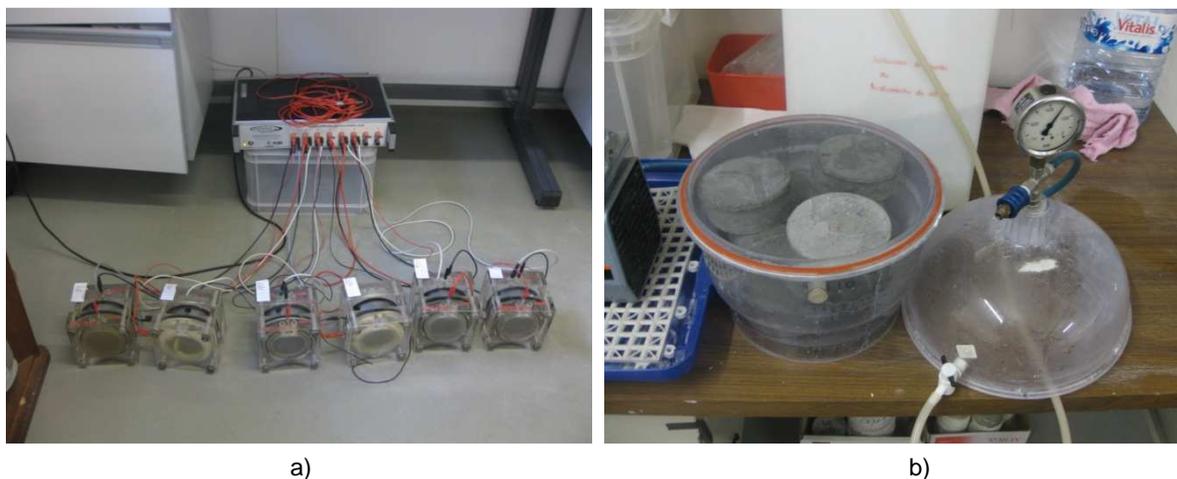


Figura 3.30 – Ensaio de penetração acelerada por cloretos. a) Equipamento para o ensaio de migração em regime não estacionário; b) Câmara de vácuo.

Finalizado este processo de migração os provetes foram abertos axialmente por compressão linear e, para se visualizar e medir as profundidades de penetração, pulverizaram-se as secções rectangulares com uma solução de nitrato de prata. Estas secções foram sujeitas à luz de uma lâmpada fluorescente para que se visualizasse mais facilmente o precipitado branco de cloreto de prata. Após ser visível a profundidade de penetração facultada pelo precipitado branco de cloreto de prata, procedeu-se à medição da profundidade de penetração de 10 mm em 10 mm, segundo o diâmetro do provete, com uma folga de 10 mm a cada bordo, obtendo deste modo sete valores para a profundidade. Estas medições foram realizadas com a precisão de 0,1mm.



Figura 3.31 - Profundidade de penetração de cloretos (parte mais clara).

Como se pode verificar na Figura 3.31, a profundidade de penetração de cloretos, denunciada pelo nitrato de prata foi mais acentuada nos provetes de controlo e atingiu menos os provetes de SF e GP20. Note-se também que um dos três provetes de cada argamassa apresenta uma profundidade de penetração relativamente menor que os restantes. O que gerou estas diferenças foi muito possivelmente a compactação. Devido à grande dimensão do molde face ao compactador, uma vez que este foi concebido para compactar moldes prismáticos muito mais leves e de menor dimensão (segundo a NP EN 196-1), e ao seu peso excessivo, é possível que a compactação destes provetes não seja homogénea, embora não se tenha notado tanto (apenas em dois tipos de argamassa, CTL e GP20) esta questão no ensaio de absorção capilar que utiliza o mesmo tipo de provetes obtidos do mesmo modo.



Figura 3.32 - Compactação dos moldes para o ensaio de penetração de cloretos.

O coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado com base na equação 3 (LNEC E-463):

$$D = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (3.3)$$

Na qual:

D é o coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$;

U é o valor absoluto da voltagem aplicada, em V;

T é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, em °C;

L é a espessura do provete, em mm;

x_d é o valor médio da profundidade de penetração, em mm;

t é a duração do ensaio, em horas.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.12 e na Figura 3.33. As argamassas de controlo apresentam o maior coeficiente de difusão, como seria de esperar. Nas restantes argamassas o coeficiente de difusão foi idêntico, sendo o GP20 que assume menor valor.

Tabela 3.12 - Coeficiente de difusão de cloretos.

Provete	$D_{\text{esq}} (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$	$D_{\text{ns_medio}} (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$	Desvio Padrão
CTL - 1	19,6	16,2	3,1
CTL - 2	15,2		
CTL - 3	13,7		
SF - 1	8,8	9,0	2,8
SF - 2	6,3		
SF - 3	11,9		
GP10 - 1	12,6	9,5	2,9
GP10 - 2	9,1		
GP10 - 3	6,9		
GP20 - 1	6,6	7,8	2,8
GP20 - 2	5,9		
GP20 - 3	11,0		

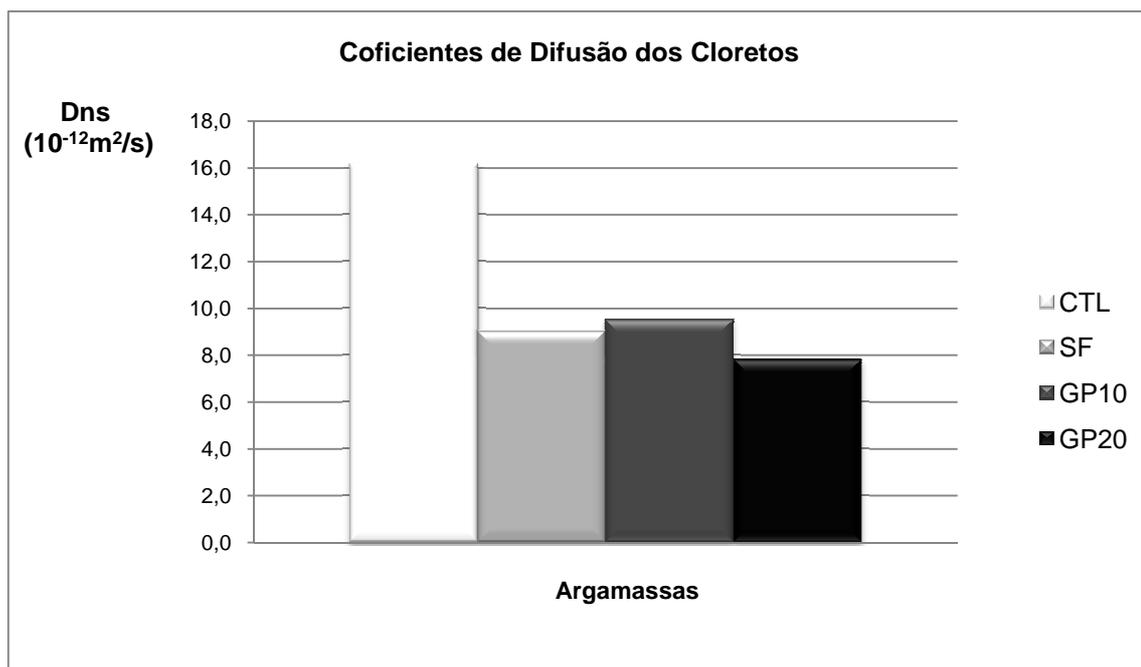


Figura 3.33 - Coeficiente de difusão de cloretos (média de 3 provetes para cada argamassa).

3.3.10. REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)

A reacção álcali-sílica no betão é uma variedade particular de reacção química no interior de um betão que envolve hidróxidos alcalinos, normalmente derivado do cimento utilizado, e sílica reactiva presente nos agregados. Essa reacção química também necessita de água para se produzir o produto da reacção que é um gel silico alcalino que dilata com a absorção de humidade. A quantidade de gel e as pressões exercidas são muito variáveis, dependendo da temperatura de reacção, tipo e proporções de materiais reagentes, composição de gel, e outros factores, mas muitas vezes são suficientemente elevado para induzir o desenvolvimento e propagação de micro fissuras no betão que, por sua vez, resulta na expansão e ruptura do betão afectado, estrutura ou elemento. Sintomas típicos da reacção álcali-sílica em elementos de betão incluem fissuração, expansão e consequente desalinhamento estrutural dos elementos, fragmentação, e a presença de gel nas fracturas ou associadas com as partículas agregadas dentro do próprio betão.

A dimensão dos agregados causando maior expansão ASR depende da natureza e composição do agregado. Na maioria dos casos, os efeitos mais negativos, levando a uma maior expansão devido à ASR, são alcançados quando as partículas apresentam tamanhos maiores que 1 mm.

Para avaliar a ASR foi realizado o ensaio da barra de argamassa segundo a norma americana ASTM C 1260, porém, algumas alterações foram feitas, nomeadamente na proporção de materiais secos a usar numa amassadura, ponto 7.4.3 as proporções seriam 2.25 de areia e 0.47 de água, no entanto foram preferidas as relações referidas na NP EN 196-3, 3 e 0.5 de água e areia, respectivamente. A areia usada (CEN) também é diferente em termos da granulometria preconizada na ASTM 1260. A amassadura foi realizada de acordo com a NP EN 196-1. Segundo um especialista do LNEC nesta área, estas diferenças por si só não acarretam grandes alterações nos resultados.

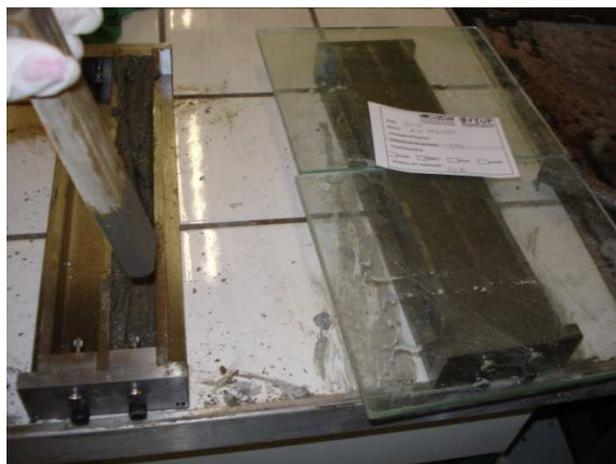


Figura 3.34 - Compactação da argamassa no molde do ensaio ASR.

Seguiu-se o procedimento normal de medição da trabalhabilidade e procedeu-se à moldagem.

Os moldes do ensaio da barra de argamassa foram cuidadosamente pincelados com óleo descofrante, colocando-se apenas os parafusos metálicos depois de olear para evitar a contaminação destes. Preencheram-se os moldes com duas camadas de argamassa, compactando cada uma delas. A argamassa foi trabalhada nos cantos do molde, a volta dos parafusos e ao longo das superfícies do molde até obter um provete homogêneo. Depois da camada de topo estar compactada retirou-se o excesso de argamassa. Os provetes permaneceram nos moldes 24 ± 2 h. Desmoldados os provetes, houve o especial cuidado em identificá-los e também numerar as suas faces para que a ordem da medição da expansão segundo as 4 faces fosse sempre constante e para que as medições se realizassem sempre na mesma posição.

Existindo apenas 2 moldes disponíveis para a realização do ensaio, optou-se por, num primeiro dia serem fabricados os provetes de argamassa com GP's, GP10 e GP20, e no dia seguinte os provetes CTL e SF. Esta opção foi tomada pois o aparelho de banho-maria tem a sua capacidade limitada a três caixas, ou seja, apenas 3 espécies diferentes poderiam ser ensaiadas em simultâneo, e tendo de ficar separadas as várias espécies de argamassa, juntaram-se os GP's numa só caixa, o CTL numa segunda caixa e a SF na última.

Colocaram-se os provetes de cada espécie na respectiva caixa com água suficiente para que ficassem imersos. Fecharam-se devidamente as caixas e colocaram-se em banho de água a $80 \pm 2.0^\circ\text{C}$ durante 24h.

Decorridas 24 h removeram-se os provetes de uma vez da água e secaram-se as suas superfícies com uma toalha prestando particular atenção aos parafusos metálicos que deviam ser bem secos. Fez-se então a leitura zero de cada provete imediatamente após estarem secos. O processo de secagem e leitura não deveria durar mais do que 15 ± 5 s a partir do momento que os provetes eram retirados da água, o que nem sempre foi cumprido estritamente designadamente nos provetes com GP's, pois existiam 4 tornando-se necessário mais tempo. Depois da leitura o provete medido ficava em espera numa toalha enquanto se faziam as leituras dos restantes. Colocaram-se os provetes da mesma espécie numa caixa contendo hidróxido de sódio a 80°C estando estes completamente imersos, fecharam-se e arrumaram-se novamente no banho de água.



Figura 3.35 - Provetes em banho-maria e submersos em NaOH nos recipientes.

As leituras subsequentes, foram feitas aproximadamente à mesma hora durante um período de 14 dias após a leitura zero. O grupo de provetes de GP teve mais uma leitura devido ao seu fabrico antecipado um dia dos restantes. Antes da medição da expansão de cada provete, o aparelho de medição era calibrado por uma barra de invar e “zerado” se porventura necessário. A medição da expansão de um provetes encontra-se exemplificada na Figura 3.36.

Realizadas as leituras de uma espécie de provetes estes eram novamente colocados na sua caixa e seguia-se mais uma espécie e assim sucessivamente.

Sempre que necessário foram repostos o nível de água do banho e o nível de NaOH nos recipientes que continham os provetes. Não foram realizadas leituras nos fins-de-semana existentes no período de 14 dias de realização do ensaio.

Os resultados do ensaio foram obtidos de seguinte forma:

→ Efectuaram-se as medições das leituras (depois de zerado com a barra de invar) em cada uma das faces de cada provete – L_i ;

→ Calculou-se a média aritmética da do comprimento real em cada dia de cada provete

$$Lx = \frac{\sum_{i=1}^4 L_i}{4} \quad (3.4)$$

→ A expansão é a diferença entre o comprimento médio em cada dia e a leitura zero, L_0 , em percentagem

$$e = \frac{Lx - L_0}{250} * 100\% \quad (3.5)$$

As expansões obtidas ao longo do tempo encontram-se representadas graficamente na Figura 3.36, os valores médios das expansões dos provetes de cada argamassa encontram-se na Tabela 3.13. Como se pode verificar os provetes de SF são os que sofreram menor expansão ASR seguidos pelas argamassas de GP20. O GP10 não teve um comportamento tão favorável como o GP20, sendo a sua expansão relativamente próxima da expansão do CTL.

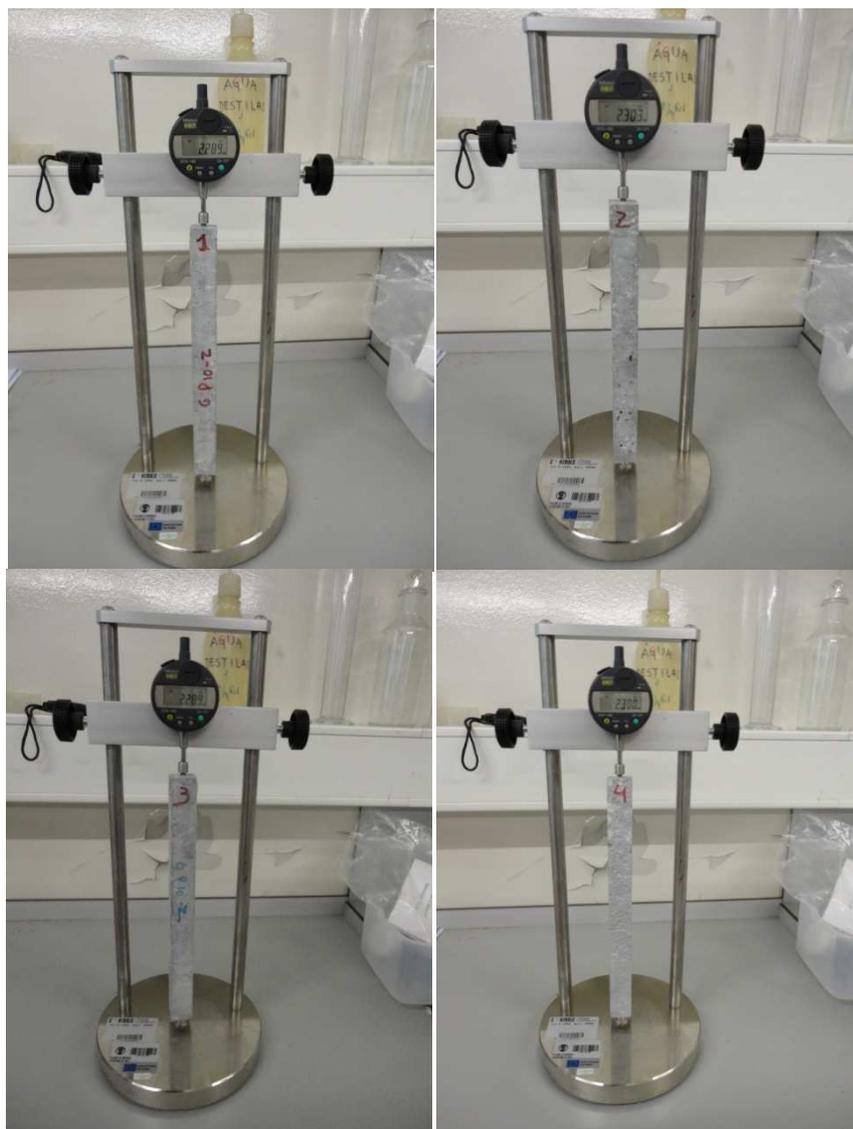


Figura 3.36 – Sequência da medição da expansão de um provete.

Tabela 3.13 - Expansões médias ao fim de 14 dias.

	e 14dias (%)	e médio (%)	Desvio padrão
CTL 1	0,182	0,177	0,006
CTL 2	0,173		
SF 1	0,038	0,034	0,005
SF 2	0,031		
GP10-1	0,137	0,130	0,009
GP10-2	0,124		
GP20-1	0,043	0,041	0,002
GP20-2	0,039		

Segundo a especificação E-461-3 do LNEC, para averiguar a reactividade de agregados se a expansão for inferior a 0.10% ao fim de 14 dias o agregado é da Classe I (agregado não reactivo), entre 0.10% e 0.20% da Classe II (agregado potencialmente reactivo) e superior a 0.20% Classe III (agregado potencialmente reactivo), sendo os da classe III mais reactivos do que os da classe II.

No presente trabalho o agregado, areia CEN resultou em reactivo da Classe II usando um ligante constituído por 100% de cimento CEMI. O facto da areia CEN ser reactiva e portanto a expansão ter resultado num valor razoável permite compreender que quando se utiliza GP verifica-se uma mitigação da reacção álcali-sílica, tanto maior quanto mais adição se utiliza, aproximando-se do efeito da sílica de fumo, comprovado por vários autores (*Shayan & Xu, 2004., Taha & Nounu, 2007.*).

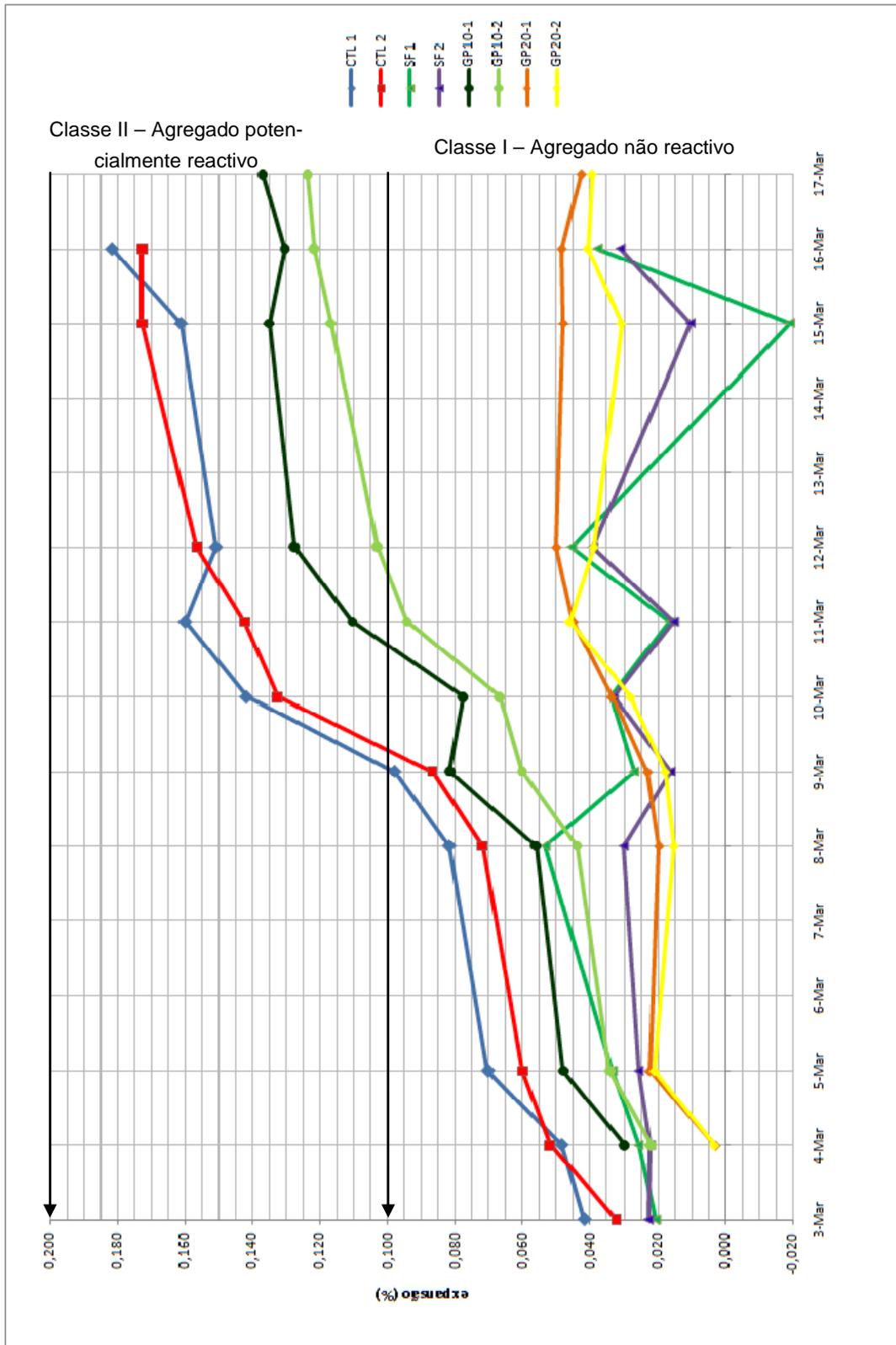


Figura 3.37 - Curva expansão tempo do ensaio ASR.

3.4 BIBLIOGRAFIA

- ASTM C 109/90 - *ASTM Designation C109-90-Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*.
- ASTM C 1260- 94 *Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)*. Philadelphia
- ASTM C 230 - *ASTM Designation C230M-98-Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of hydraulic Cement*. Philadelphia
- ASTM C 490 – *ASTM Designation C 490 - Standard Practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete*. Philadelphia.
- Instituto Português da Qualidade - *Método de ensaios de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas NP EN 196-1*. Lisboa, IPQ, 2006.
- Instituto Português da Qualidade - *Método de ensaios de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e expansibilidade NP EN 196-3*. Lisboa, IPQ, 2006.
- Instituto Português da Qualidade - *Método de ensaios de cimentos. Parte 3: ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos NP EN 196-5*. Lisboa, IPQ, 2006.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil - *Betões. Determinação da resistência à carbonatação E-391*. Lisboa, LNEC, 1993.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil - *Betões. Determinação da absorção de água por Capilaridade E-393*. Lisboa, LNEC, 1993.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil – *Betões. Metodologias para prevenir reacções expansivas internas. E-461*. LNEC, Lisboa, 2004.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil - *Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário E-463*. Lisboa, LNEC, 2004.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. *Cimentos. Determinação da massa volúmica E-64*. Lisboa, LNEC, 2009.
- Neville, A. M.. *Properties of concrete*. 4th ed. Harlow: Addinon Wesley Longman, 1995
- RILEM TC 116-PCD – *Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability. Recommendations*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, Vol, 32, April 1999, pp 174-179.
- S. Multon, M. Cyr, A. Sellier, N. Leklou, L. Petit. *Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion*. Cement and Concrete Research 38, 2008, pp 350–359.
- Sousa Coutinho, Joana. *Materiais de Construção 2 1ª Parte – Ligantes e caldas 2002*. Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto, Porto, 2002, actualizada em 2010.
- Sousa Coutinho, Joana. *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem. Tese de Doutoramento*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1998.

4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No capítulo anterior foi analisada uma série de propriedades relativas, em primeiro lugar, aos materiais utilizados e, posteriormente, às argamassas obtidas com substituição parcial do cimento por GP com vista a determinar as potencialidades de utilização deste material como substituição parcial do cimento em betão estrutural.

O capítulo presente tem por objectivo a análise dos resultados obtidos através dos ensaios descritos no capítulo anterior por meio de comparações do GP pozolânico em relação ao CTL

4.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS E PROPRIEDADES

4.2.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para os diferentes tipos de argamassa, foi calculado o desempenho de cada uma das propriedades estudadas em relação aos provetes de controlo, tendo-se utilizado para o efeito a seguinte equação:

$$Desempenho = \left| \frac{(X - Propriedade X_{CTL})}{X_{CTL}} \right| * 100\% \quad (4.1)$$

Em que:

X – Resultado da propriedade X para a argamassa com substituição de cimento por SF ou GP.

X_{CTL} – Resultado da propriedade X para a argamassa de controlo.

Um sinal negativo ou positivo foi atribuído a esse desempenho conforme mostrou melhor ou pior performance do que o CTL, respectivamente.

4.2.2. ANÁLISES QUÍMICAS

No caso de betão armado ou pré-esforçado, não se produz, à partida, betão com cloretos pelo que se procede a ensaios para verificar a quantidade de cloretos existentes.

No que se refere ao cimento a quantidade de cloretos é determinada actualmente pela NP EN 196-2. Em termos de limites do teor em cloretos no cimento, segundo a NP EN 197-1 deverá ser inferior a 0,1% da massa do cimento (NP EN 197-1) para todos os cimentos correntes e o teor de cloretos de todos os constituintes do betão devem ser somados.

Tabela 4.1 - Requisitos químicos dos cimentos (NP EN 197-1).

1	2	3	4	5
Propriedade	Referência de ensaio	Tipo de cimento	Classe de resistência	Requisitos ^{a)}
Perda ao fogo	EN 196-2*	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0 %
Resíduo insolúvel	EN 196-2* ^{b)}	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0 %
Teor de sulfatos (em SO ₃)	EN 196-2*	CEM I CEM II ^{c)}	32,5 N	≤ 3,5 %
			32,5 R	
		CEM IV CEM V	42,5 N	≤ 4,0 %
			42,5 R	
			52,5 N 52,5 R	
CEM III ^{d)}	Todas			
Teor de cloretos	EN 196-21*	Todos ^{e)}	Todas	≤ 0,10 % ^{f)}
Pozolanicidade	EN 196-5*	CEM IV	Todas	Satisfaz o ensaio

^{a)} Os requisitos são indicados em percentagem da massa do cimento como produto final.
^{b)} A determinação do resíduo insolúvel é em ácido clorídrico e carbonato de sódio.
^{c)} O tipo de cimento CEM II/B-T pode conter até 4,5 % de sulfatos em todas as classes de resistência.
^{d)} O tipo de cimento CEM III/C pode conter até 4,5 % de sulfatos.
^{e)} O tipo de cimento CEM III pode conter mais do que 0,10 % de cloretos, mas neste caso o teor máximo de cloretos deve ser referido na embalagem e ou na guia de remessa.
^{f)} Para aplicações em betão pré-esforçado, os cimentos podem ser produzidos para satisfazer um valor inferior. Se assim for, o valor de 0,10% deve ser substituído por este valor inferior, o qual deve ser indicado na guia de remessa.

Relativamente às pozolanas, estas também têm de obedecer a requisitos químicos que constam na nova norma NP 4220, e os quais se referem na Tabela 4.2. Segundo as análises químicas do GP, verificou-se que os requisitos são cumpridos, excepto no que diz respeito ao teor em álcali, cujo limite normativo é 5%, tendo este GP 17%. Relativamente à quantidade de óxido de cálcio (CaO), não é feita a distinção entre o CaO livre e reactivo, apresentando-se apenas o total na análise química. Contudo, tanto em termos de expansibilidade ASR (verificada pelo ensaio acelerado da barra de argamassa da ASTM C 1260), como em termos de expansibilidade devido ao CaO, os ensaios realizados não acusaram qualquer prejuízo em termos de expansibilidades excessivas.

Tabela 4.2 - Requisitos químicos das pozolanas (NP 4220) e verificação de conformidade do GP.

Propriedades	Métodos de ensaio	Análises químicas do GP	Critérios de aceitação
Perda ao fogo	NP EN 196-2 ⁽¹⁾	0,92%	≤ 9 %
Cloretos	NP EN 196-2	<0,005	≤ 0,10 %
Trióxido de enxofre (SO ₃)	NP EN 196-2	<0,05	≤ 3,0 %
Álcalis (expressos em Na ₂ Oeq)	NP EN 196-2	17,23%	≤ 5,0 %
Óxido de cálcio reactivo ⁽²⁾	Nota da secção 3.1 da NP EN 197-1		≤ 10,0 %
Óxido de cálcio livre	NP EN 451-1	8,70%	≤ 2,5 % ⁽³⁾
Pozolanicidade	NP EN 196-5 ⁽⁴⁾	POSITIVO	Satisfaz o ensaio

⁽¹⁾ Com tempo de calcinação de 1 h;

⁽²⁾ Em alternativa, considera-se satisfeito o teor de óxido de cálcio reactivo se, determinado o teor de óxido de cálcio total (segundo a NP EN 196-2), este for inferior a 10 %;

⁽³⁾ Se o teor de óxido de cálcio livre for > 1,0 %, deve verificar-se se a expansibilidade satisfaz o fixado no Quadro 3;

⁽⁴⁾ As proporções do cimento de referência e da pozolâna são as da classe de pozolanicidade declarada pelo produtor, estabelecidas no Quadro 2.

4.2.3. GRANULOMETRIA

A granulometria do CEM I 42.5R e do GP (moído 48 horas) é semelhante, tal como se pode observar nas curvas granulométricas ilustradas no Capítulo 3 (Figuras 2.8 a 2.10). As partículas de cimento tem uma dimensão média de cerca 17µm e no GP a dimensão média é de 20µm.

De acordo com a análise realizada e com os valores da Tabela 4.3 (repetição da Tabela 3.2), cerca de 90% das partículas de cimento e de GP são inferiores a 34µm. No que se refere a d(50), as dimensões também são muito idênticas, 11µm para o cimento e menos um micra para o GP. A dimensão d(10) é extremamente parecida. Deste modo, pode concluir-se que o GP não irá preencher os poros do cimento já que apresenta distribuição granulométrica muito idêntica, não funcionando como filler.

Tabela 4.3 - Dimensão característica das amostras em que d(X%) é o diâmetro em que X% das partículas tem dimensão inferior a d.

	d(0.1) (um)	d(0.5) (um)	d(0.9) (um)
CEM I 42.5R	1,495	11,063	33,927
GP (moído 48h)	1,776	10,186	34,108

A pequena diferença de granulometria dos materiais apresentados reflecte-se no valor obtido da superfície específica obtida pelo ensaio de granulometria laser representada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Superfícies específicas das amostras.

	Superfície específica (m ² /kg)
CEM I 42.5R	1630
GP (moído 48h)	1330

4.2.4. TRABALHABILIDADE

Os valores obtidos por este ensaio demonstram que as argamassas produzidas com substituição parcial do cimento por resíduos de vidro moídos melhoram ligeiramente a trabalhabilidade. Verificou-se ainda que para uma maior percentagem de substituição a trabalhabilidade aumentou. Isto significa que a substituição parcial de cimento por resíduos de vidros moídos permite uma economia no que se refere ao uso de superplastificante, contrariamente à sílica de fumo utilizada, que para atingir uma trabalhabilidade adequada precisou desse adjuvante.

Tabela 4.5 - Trabalhabilidade média das argamassas.

Argamassas	Trabalhabilidade ⁽¹⁾ (mm)	Desempenho
CTL	200	-
GP10	204	2,34%
GP20	206	3,09%
SF10	198	Acertada com SP

⁽¹⁾ A trabalhabilidade corresponde à trabalhabilidade média de todas as amassaduras realizadas no programa experimental para cada tipo de argamassa.

4.2.5. MASSA VOLÚMICA

O ensaio de determinação da massa volúmica provou que o cimento CEM I 42,5 R se encontrou em boas condições de realizar o estudo pois o seu valor foi de 3,16 g/cm³. Este valor é superior ao limite de 3,05 g/cm³, indicando portanto que o cimento CEMI (Coutinho, 1997) e está de acordo com a ficha técnica do CEMI 42,5R fornecida pela Secil.

O valor da massa volúmica obtido para o GP foi 2,68 g/cm³, foi um pouco superior aos obtidos por outros autores para resíduos de vidros moídos. Em relação à normalização, NP 4220, o valor da massa volúmica obtido para pozolânas deve ser o valor declarado pelo produtor $\pm 0,20$ g/cm³, porem, não é conhecido esse valor.

Alguns investigadores utilizaram resíduos de vidro específicos tanto ao nível de composição química (sodo-cálcico, boro-silicatados, etc.) como ao nível de cor (verde, âmbar). Os constituintes de cada vidro diferem em termos de quantidade atribuindo a cada tipo de vidro características específicas, como foi referido no Estado da arte. A variação das composições do vidro pode fazer oscilar a sua massa volúmica.

4.2.6. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PRESA

No que se refere à pasta de consistência normal realizada para o CTL e para os GP's, a quantidade de água foi ligeiramente superior para a argamassas produzidas com substituição parcial do cimento CEM I 42,5 R por 10 e 20% de resíduos moídos, tendo-se verificado que o GP20 necessitou de mais água do que o GP10. Estes resultados estão em desacordo com os da trabalhabilidade. De facto, para argamassas equivalentes, isto é, com a mesma razão w/c, verifica-se o ganho de trabalhabilidade, tanto maior quanto maior a percentagem de substituição de cimento por adição, mas nas pastas ocorreu o contrário.

O tempo de início e fim de presa foi idêntico nos três provetes e respeitou o previsto na norma NP EN 197-1 com uma ligeira diminuição nas argamassas produzidas com substituição parcial de cimento. De acordo com a Tabela 4.7 da norma NP EN 197-1, o cimento utilizado respeitou o tempo mínimo de presa, sendo este 2h30 min.

No que diz respeito a cimentos pozolânicos, os tempos mínimos de início de presa são definidos na norma NP 4220, assim como outras características físicas que estas devem respeitar, que se encontram na Tabela 4.6. O tempo de presa de um cimento pozolânico não deve exceder em mais de 120 minutos o tempo de presa de um cimento sem adições. Assim sendo, as pastas GP10 e GP20 cumprem o exigido na norma de pozolâneas para betão, com um tempo de início de presa de 2h20min e 2h15min, respectivamente.

Tabela 4.6 - Requisitos físicos das pozolâneas (NP 4220).

	Métodos de ensaio	Critérios de aceitação
Finura	NP EN 451-2	≤ 40,0 %
Massa volúmica	NP EN 196-6	valor declarado pelo produtor ± 0,20 g/cm ³
Índice de actividade	NP EN 196-1 ⁽¹⁾	≥ percentagem do cimento de referência correspondente à classe de pozolanicidade declarada pelo produtor (ver Quadro 2)
Expansibilidade	NP EN 196-3 ⁽¹⁾	≤ 10 mm
Tempo de início de presa		< (120 min + o tempo de início de presa (min) de provetes com 100 % de cimento de referência)
Necessidade de água		valor declarado pelo produtor ± 20 %
⁽¹⁾ Os provetes com pozolâna são executados com um ligante em que as proporções cimento de referência/pozolâna correspondem às da classe de pozolanicidade declarada pelo produtor (ver Quadro 2).		

4.2.7. EXPANSIBILIDADE

Os materiais utilizados não apresentaram sinais de expansibilidade encontrando-se dentro do limite preconizado pela norma NP EN 197-1 e NP 4220, sendo os valores de expansibilidade bastantes menores ao valor máximo de 10mm, tanto para cimentos sem adições como para cimentos pozolânicos. A expansibilidade da pasta CTL ficou no intermédio das pastas de GP, sendo a pasta GP10 que apresenta menor expansibilidade. Deveriam ter sido feitos dois provetes de cada pasta para que o resultado fosse mais legítimo.

4.2.8. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Como referido anteriormente, a resistência à compressão do cimento é a propriedade mais importante tendo que obedecer a valores mínimos especificados. A norma NP EN 197-1 classifica os cimentos em termos de resistência, em cimentos de endurecimento normal e rápido. Os de endurecimento rápido, como é evidente, dizem respeito a cimentos cuja resistência é elevada aos primeiros dias e estes cimentos terão que respeitar valores especificados aos 2 dias de idade. Apresentam-se na Tabela 4.7 os valores mínimos característicos segundo aquelas normas.

Tabela 4.7 - Valores característicos resultantes do autocontrolo efectuado pelo fabricante (NP EN 197-1).

Classe de resistência	Resistência à compressão				Tempo de início de presa min	Expansibilidade mm
	MPa					
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência			
2 dias	7 dias	28 dias				
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	-				

A Tabela 4.8 apresenta os resultados para a avaliação da resistência à compressão. Pela análise do conjunto dos resultados depreende-se que a substituição parcial do cimento CEM I 42,5 R por GP resulta numa pequena perda de resistência, mostrando, neste caso, o CTL melhor desempenho. As argamassas SF porem apresentam-se melhores que CTL para as idades mais avançadas, 90 e 180 dias. A perda de resistência é mais acentuada nas argamassas GP em idades mais jovens e com mais percentagem de substituição, melhorando, contudo, para idades mais avançadas.

Todas as resistências obtidas respeitam a NP EN 197-1, com excepção dos GP10 aos 28 dias de idade, que fica no limiar do mínimo exigido. Faltaria, no entanto, ensaiar aos 2 dias de idade já que se

utilizou um cimento de elevada resistência inicial. Prevê-se contudo que o prejuízo de resistência iria ser ainda maior nesta idade.

Tabela 4.8 - Resultados e desempenho da resistência à compressão.

	CTL	SF	GP10	GP20
R7	44,75	39,58	36,35	29,79
Desempenho	-	-11,56%	-18,78%	-33,44%
R28	53,31	52,50	47,05	41,74
Desempenho	-	-1,53%	-11,74%	-21,71%
R90	53,63	60,58	50,82	54,27
Desempenho	-	12,97%	-5,25%	1,19%
R180	57,53	60,00	52,34	52,63
Desempenho	-	4,30%	-9,02%	-8,51%

4.2.9. ÍNDICE DE ACTIVIDADE

O índice de actividade de uma adição corresponde à razão (em percentagem) entre a resistência à compressão de provetes normalizados de argamassa preparados com determinada percentagem (em massa) da adição em estudo e a restante de cimento de referência e a resistência à compressão de provetes normalizados de argamassa preparados apenas com cimento de referência, ambos ensaiados com a mesma idade e condições.

A classe de pozolanicidade é a razão entre as percentagens de cimento de referência e de pozolana que satisfaz o ensaio de pozolanicidade. Por exemplo, a classe de pozolanicidade POZ 85/15, corresponde a uma mistura de 85% de cimento de referência com 15% de pozolana. As classes de pozolanicidade designadas na NP 4220 encontram-se na tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Classes de pozolanicidade e respectivas composições do ligante da argamassa normal (NP 4220).

Classes de pozolanicidade	Ligante da argamassa normal	
	cimento de referência (% em massa)	pozolana (% em massa)
POZ 90/10	90	10
POZ 85/15	85	15
POZ 80/20	80	20
POZ 75/25	75	25
POZ 70/30	70	30
POZ 65/35	65	35
POZ 60/40	60	40

No caso de estudo as classes de pozolanicidade são POZ 90/10 (GP10) e POZ 80/20 (GP20). Como referido na tabela 4.6, pertencente à mesma norma, o índice de actividade deve ser igual ou superior à percentagem do cimento de referência correspondente à classe de pozolanicidade.

Os valores do índice de actividade para a substituição de 10% e 20% de cimento por GP, para idades de 28 e 90 dias, encontram-se na Tabela 4.10. Como se pode verificar, as argamassas GP não respeitam o índice de actividade exigido aos 28 dias, embora estejam próximos do exigido. Contudo, aos 90 dias de idade este critério é satisfeito, e até bastante acima do mínimo exigido no caso das

argamassas GP20. No que se refere à sílica de fumo, “rainha das adições”, aos 28 dias apresentou um índice próximo de 100%.

A demora no ganho de resistência por parte das argamassas GP seria à partida previsível, uma vez que o processo de hidratação de cimentos pozolanicos é mais lento.

Tabela 4.10 – Índices de Actividade das pozolanas e comparação com o mínimo exigido (NP 4220).

	R28	Mínimo exigido aos 28 dias	R90
SF	98,47%	90%	115,36%
GP10	88,26%	90%	96,76%
GP20	78,29%	80%	103,33%

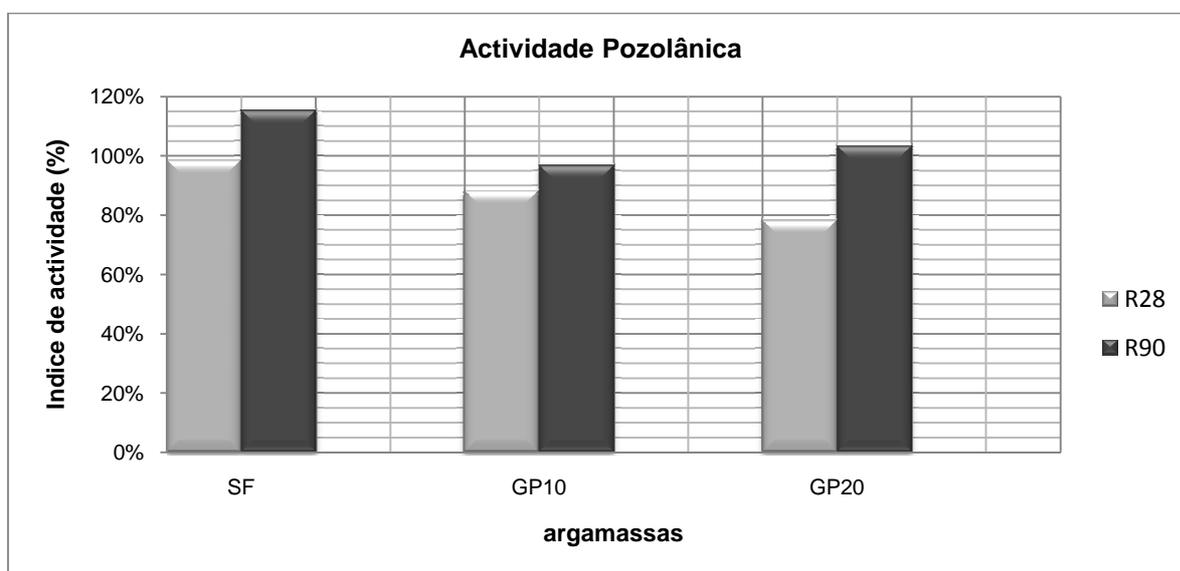


Figura 4.1 - Índice de actividade pozolânica das argamassas com adições de SF e GP aos 28 e 90 dias de idade.

4.2.10. CARBONATAÇÃO ACELERADA

Os resultados obtidos face à carbonatação acelerada foram reticentes. Como se conhece a granulometria da adição usada, e se sabe que são materiais granulometricamente semelhantes ao cimento utilizado, a carbonatação do betão é mais rápida nas argamassas com essas adições. De facto, por um lado, a rede porosa é mais grosseira, difundindo-se o CO₂ facilmente, e pelo outro, como as adições consomem Ca(OH)₂, a quantidade disponível é menor nas argamassas com estas adições, propiciando uma carbonatação mais rápida (o pH no interior do betão desce mais rapidamente). Quando as adições são mais finas que o cimento, e em geral devem sê-lo, o efeito físico do refinamento dos poros pode sobrepor-se ao efeito da diminuição de Ca(OH)₂, sobretudo para razões w/c reduzidas onde os poros já são, à partida, mais finos. De qualquer modo, nos casos estudados

neste trabalho, a carbonatação foi sempre superior à argamassa de controlo, mesmo para as argamassas com sílica de fumo.

Tabela 4.11 - Resultados e desempenho do ensaio da carbonatação acelerada.

	Profundidade Média 2 meses (mm)	Desempenho	Profundidade Média 4 meses (mm)	Desempenho
CTL	1,303	-	3,009	-
SF	3,290	-152,56%	7,245	-140,74%
GP10	3,203	-145,84%	4,911	-63,18%
GP20	3,317	-154,58%	7,941	-163,88%

No intervalo de tempo entre 2 e 4 meses, a carbonatação sofreu um agravamento considerável nas argamassas de GP20, ligeiro no CTL e manteve-se praticamente constante nas de SF.

A resistência à carbonatação mostrou-se um ponto fraco neste material, o que não é desprezável, já que a carbonatação é uma das principais causas da falta de durabilidade das estruturas de betão.

Estes resultados não foram comparados/validados pois não foi encontrado qualquer estudo que avaliasse esta propriedade, não significando porém que não exista.

4.2.11. PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS

A penetração de cloretos é um factor importante para que ocorra corrosão. A norma ENV 2006 classifica os betões no que se refere à penetração de cloretos em função de coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário obtido no ensaio acelerado (segundo a especificação LNEC E-463).

Tabela 4.12 - Classe de resistência à penetração de cloretos no betão (ENV 2006).

Coeficiente de difusão em estado não estacionário, D_{ns}	Classe de resistência à penetração de cloretos
$D_{ns} \geq 15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Baixa
$10 \cdot 10^{-12} < D_{ns} < 15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Moderada
$5 \cdot 10^{-12} < D_{ns} < 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Elevada
$2,5 \cdot 10^{-12} < D_{ns} < 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muito Elevada
$D_{ns} \leq 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Extremamente Elevada

Os resultados obtidos encontram-se na tabela seguinte e indicam que o CTL foi o mais sensível ao ataque por cloretos, apresentando de longe o maior coeficiente de difusão. O melhor resultado foi obtido para os provetes GP20, cujo coeficiente é cerca metade relativamente ao CTL. Os provetes de sílica de fumo e GP10 apresentam coeficientes de difusão bastante semelhantes, embora o da sílica seja ligeiramente inferior. Segundo a norma ENV 206, o CTL apresenta uma classe de resistência à penetração de cloretos baixa e os restantes tem resistência moderada e/ou elevada.

Tabela 4.13 – Valores do coeficiente de penetração de cloretos em regime não estacionário e respectivo desempenho.

Provete	$D_{ns} \text{ médio } (10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	Desempenho	Classe de resistência à penetração
CTL	16,2	-	Baixa
SF	9,0	44,44%	Moderada-Elevada
GP10	9,5	41,36%	Moderada-Elevada
GP20	7,8	51,85%	Elevada

4.2.12. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Este parâmetro pode ser classificado para o betão segundo a Tabela 4.13, mas como o trabalho se refere a argamassas, poder-se-á prever que os limites apresentados serão mais elevados para as argamassas CEN. Na realidade a absorção será, em princípio, mais intensa numa argamassa relativamente a um betão semelhante, pois o agregado grosso dificultará os percursos da água através da rede porosa (Coutinho 2007).

Tabela 4.14 - Coeficientes de absorção em betão (adaptado de Browne, 1991; Neville, 1995 and Bertolini et al., 2004, 2007).

Qualidade do betão	Coeficiente de absorção
Baixa	$S > 0,2 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$
Média	$0,1 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}) < S < 0,2 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$
Elevada	$S < 0,1 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$

Começando por se comparar as curvas de absorção das series relativas a cada provete. Analisando as curvas de absorção apresentadas na Figura 3.27 do Capítulo 3, constata-se que as curvas são muito semelhantes. Isto significa que a introdução de adição de GP no cimento não modificou praticamente a rede porosa.

Os resultados obtidos para o ensaio de absorção, bem como a comparação de desempenho encontram-se na tabela seguinte. Os coeficientes de absorção obtidos mostram que as argamassas são de qualidade elevada segundo Coutinho (2007), no entanto, as argamassas SF são as que apresentam o menor coeficiente de capilaridade. Esta facto seria, de certa forma previsível, uma vez que a sílica de fumo tem uma granulometria mais fina do que o cimento e do que o pó de vidro. Assim sendo, as partículas de sílica de fumo, preenchem alguns poros do cimento, dificultando a absorção.

Tabela 4.15 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade e respectivos desempenhos.

	$S_{\text{Médio}}$	Desempenho	Qualidade (segundo <i>Coutinho</i> , 2007)
CTL	0,0477	-	Elevada
SF	0,0395	17,20%	Elevada
GP10	0,0471	-1,52%	Elevada
GP20	0,0480	0,71%	Elevada

4.2.13. REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)

Tal como já foi estudado por diversos investigadores, a ASR seria o ponto mais crítico no que se refere ao uso de resíduos de vidro em betão. Porém, também se sabe que as partículas são reactivas apenas quando apresentam uma dimensão considerável, cerca de 1mm. Neste caso, e como seria expectável, a expansão ASR, seguindo o ensaio descrito na norma americana ASTM 1260, para os provetes GP's não se mostrou perigosa. Aliás a expansão foi inferior nos provetes de GP relativamente ao CTL.

Deve contudo salientar-se que a norma que serviu de base a detectar a ASR é apropriada para agregados e não para adições. Mais ainda, os provetes foram fabricados de acordo com a NP EN 196-3, e portanto o traço da argamassa não é o mesmo do que o sugerido na ASTM 1260.

Segundo a especificação E-461-3 do LNEC, para uma expansão inferior a 0,10% ao fim de 14 dias o agregado é da Classe I (agregado não reactivo), entre 0,10% e 0,20% da Classe II (agregado potencialmente reactivo) e superior a 0,20% Classe III (agregado potencialmente reactivo), sendo os da classe III mais reactivos do que os da classe II. O limite 0,10% encontra-se marcado no gráfico expansão tempo na Figura 3.36 do capítulo 3. Neste caso não foram avaliados os agregados, mas sim a reactividade das pozolânas face ao álcali do cimento comparando estas com o CTL. O GP foi usado como substituto parcial de cimento, apresentou expansão ASR significativamente reduzida, mesmo com alto teor de álcalis (os resíduos de vidro utilizados continham cerca de 17% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), tal como foi obtido por outros investigadores. O tamanho reduzido dos grãos do GP atenuou a expansão e melhorou-a até.

Tabela 4.16 - Expansão ASR e respectivo desempenho.

	$e_{\text{médio}} (\%)$	Desempenho
CTL	0,177	-
SF	0,034	80,58%
GP10	0,130	26,34%
GP20	0,041	76,85%

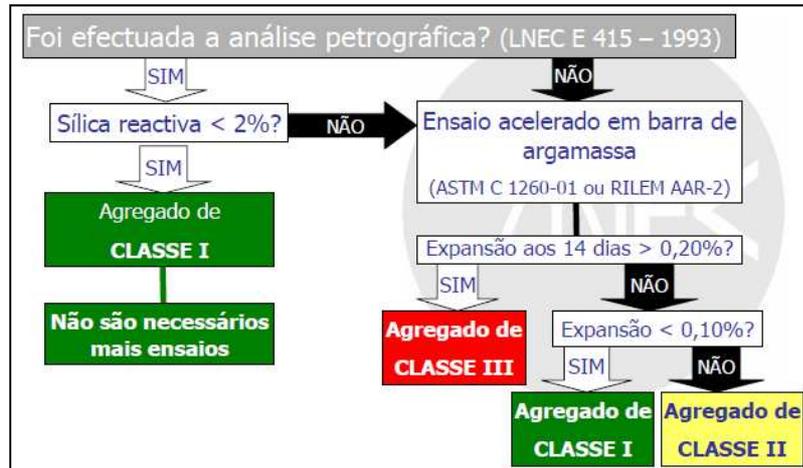


Figura 4.2 - Especificação LNEC E- 461.

4.3. BIBLIOGRAFIA

Bertolini L., Elsener B., Pedferri P. and Polder R. Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair, 2004, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Brown P. W. and Dex S. Porosity/Permeability Relationships. In: Materials Science of Concrete, 1991, Vol. 2, J. Skalny and S. Mindess (Eds), American Ceramic Society.

Browne R. D. *Field Investigations: Site & Laboratory Tests: Maintenance, Repair and Rehabilitation of Concrete Structures*, 1991, Lisbon: CEEC.

Coutinho, J. Sousa. *CINZA DE CASCA DE ARROZ (RHA) INDUSTRIAL - ENSAIOS*. Porto: FEUP, 2007.

ICE Manual of Construction Materials. Institution of Civil Engineers, 2009.

Instituto Português da Qualidade. *Pozolanas para betão, argamassa e caldas Definições, requisitos e verificação da conformidade NP4220*. Lisboa, IPQ, 2009.

Instituto Português da Qualidade. *Betão. Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade ENV 206*. Lisboa, IPQ, 1993.

Instituto Português da Qualidade. *Cimento. Parte 1 Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes Parte 1 NP EN 197-1*. Lisboa, IPQ, 2006.

Instituto Português da Qualidade. *Cinzas volantes para betão Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade NP EN 450-1 2006*. Lisboa, IPQ, 2005 (A1 2008).

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - *Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário E-463*. Lisboa, LNEC, 2004.

Neville A. M. *Properties of Concrete, 4th edition*. Harlow: Longman, 1995.

Sousa Coutinho, Agostinho de. *Fabrico e Propriedades do Betão – Volume 1*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1997.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTO FUTUROS

5.1. INTRODUÇÃO

No capítulo 4 fez-se uma análise dos resultados obtidos, comparando cada resultado ou propriedade com o CTL. Neste capítulo proceder-se-á validação dos resultados obtidos através da comparação com os resultados obtidos por outros investigadores. A validação é, contudo um pouco limitada pelos métodos de ensaio, normas, materiais, que esses autores utilizaram.

No final deste capítulo apresenta-se a comparação geral de todos os resultados obtidos no que se refere a características de durabilidade e resistências mecânicas, as conclusões gerais do trabalho realizado bem como sugestões de desenvolvimentos futuros.

5.2. VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

O objectivo global do presente trabalho resume-se a comprovar que a aplicação do GP como substituto parcial de cimento Portland melhora a durabilidade do betão. Considerou-se que seria mais importante analisar um leque vasto de resultados mesmo que nas respectivas investigações esses ensaios tenham sido realizados com diferentes percentagens de substituição de GP, tanto como por agregados como substituto parcial de cimento Portland. Esta tarefa foi um pouco condicionada pela variedade de tipos e condições de ensaios utilizados por esses autores para medir parâmetros relacionados com a durabilidade. Os desempenhos apresentados em percentagem obtidos por outros autores, refere-se sempre ao CTL por eles usado.

5.2.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química do vidro utilizado por alguns investigadores difere, principalmente com a proveniência dos resíduos, com a sua cor e finalidade de uso. Assim sendo compararam-se as composições dos resíduos de vidro usados neste estudo, com a composição de vidro usado por outros autores cujos resultados em relação à durabilidade foram positivos. Como se constata na Tabela 5.1, em termos da quantidade de sílica os vidros usados são muito semelhantes, assim como ferro e cálcio. Neste trabalho o vidro apresentou um teor em álcali equivalente (Na_2Oeq) um pouco superior aos restantes, no entanto isso não provocou nenhum problema de ASR, segundo o ensaio acelerado da barra de argamassa (ASTM C 1260). Refere-se contudo que este ensaio nem sempre é conclusivo, como referido anteriormente no Capítulo 2 na Tabela 2.4., pode não detectar reactividade em agregados de reactividade lenta ou retardada.

Tabela 5.1 - Composição química do GP usados por vários autores (apenas se apresentam os componentes com relevância).

Autores	Composição química do GP										Observações
	SiO ₂	AlO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ Oeq ⁽¹⁾	LOI ⁽²⁾	
Shayan & Xu (2004 e 2006)	72,42%	1,44%	0,07%	11,50%	0,32%	0,21%	13,64%	0,35%	13,870%	-	Vidro claro
	72,21%	1,37%	0,26%	11,37%	0,46%	0,10%	13,75%	0,20%	13,882%	-	Vidro castanho
	72,38%	1,49%	0,29%	11,26%	0,54%	0,07%	13,52%	0,27%	13,698%	-	Vidro verde
Schwarz et al (2008)	72,50%	0,40%	0,20%	9,70%	3,30%	-	13,70%	0,10%	13,77%	0,36%	
Jain & Neithalath (2010)	72,50%	0,40%	0,20%	9,70%	3,30%	-	13,70%	0,10%	13,77%	-	
Idir et al (2010)	68,60%	2,00%	0,30%	12,30%	1,00%	0,20%	13,50%	0,60%	13,89%	1,00%	Vidro sodo-cálcico com cores misturadas
Sacanni & Bignozzi (2010)	70,20%	2,06%	0,02%	11,10%	1,47%	-	13,10%	1,21%	13,90%	-	Vidro sodo-cálcico
Ana Matos (2010)	70,00%	-	0,65%	8,70%	3,70%	-	17,00%	0,35%	17,23%	0,92%	Pensa-se que pertence ao tipo sodo-cálcico (ver Tabela 2.1 do Capítulo 2)

⁽¹⁾ Na₂Oeq (%) = Na₂O(%) + 0,658*K₂O(%)

⁽²⁾ Perda ao rubro

5.2.2. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Apenas foi dada relevância à resistência à compressão, pois a resistência à tracção do betão não é significativa.

Os ensaios de resistência à compressão de betões e/ou argamassas com adição de GP, revelaram, na maior parte dos casos, um decréscimo na resistência à compressão para todas as idades. A tendência geral é que a perda de resistência mecânica diminui à medida que aumenta a idade e que a diminuição é superior para maiores percentagens de substituição. Esta tendência também se verificou nesta investigação.

Idir et al. (2010) obtiveram resistências mecânicas bastante superiores quando usaram GP, mas para substituir agregado fino e não cimento. Estes autores usaram GP muito fino, como se verifica pela dimensão média das partículas, o que provavelmente originou argamassas mais densa e logo mais resistentes.

Shayan & Xu (2004) realizaram um estudo bastante semelhante a este e também obtiveram resistências mecânicas inferiores, assim como *Schwarz et al* (2008).

As diferenças nos estudos realizados, tais como, composição das argamassas e/ou betões, tipo de cura até à data do ensaio, influencia das normas de cada país, bem como o tamanho das partículas de vidro e composição química deste, não permitem uma comparação ideal dos resultados de vários autores.

Tabela 5.2 - Desempenho das resistências mecânicas de betões ou argamassas com adição de GP obtidos por vários autores.

Autores	Material	Percentagem de substituição	Dimensão das partículas GP (μm)	Resistência à compressão			Observações	
				R7	R28	R90		
Shayan & Xu (2004)	Argamassa	10%	39%<5 μm		-10%		As argamassas ensaiadas aos 90 dias diferem das ensaiadas aos 28 dias, por serem fabricadas com	
		20%	49% 5-10 μm		-29%	-13%		
		30%	4,4% 10-15 μm		-33%	-19%		
	Betão	10%	39%<5 μm		-5%	9%		As restantes partículas têm dimensão superior a 15 μm
		20%	49% 5-10 μm		-10%	0%		
		30%	4,4% 10-15 μm		-20%	-5%		
Shayan & Xu (2006)	Betão	20%	d(90)=10 μm	-16%	-20%	-16%	Resistência mecânica em cilindros de betão. Os provetes estiveram em câmara húmida até à data	
		30%		-44%	-42%	-21%		
Chunques et al (2006)	Betão	10%			30%		Cimento CPIII, que corresponde a um cimento de alto-forno, ou seja, 25%-65% de clínquer + gesso, 35%-70% de escória de alto-forno; 0-5%	
		15%			10%			
Schwarz et al (2008)	Argamassa	5%				-10%		
		10%	d(10)=4 μm			-7%		
	20%	d(50)=20 μm			-18%			
	Betão	10%	d(90)=100 μm	-27% ⁽¹⁾	-1%	-16%	⁽¹⁾ Neste caso não foi R7, mas sim R3	
Schwarz et al (2008)	Argamassa	20%	d(50)=20 μm d(90)=100 μm	-18%	-11%		Ensaio de acordo com ASTM C 311	
Idir et al (2010)	Argamassa	20%	120 μm		33%		A dimensão das partículas corresponde à dimensão média das partículas. Neste caso é substituído agregado fino	
			11 μm		50%			
			8 μm		67%			
Ana Matos (2010)	Argamassa	10%	d(10)=2 μm	-19%	-12%	-5%	Ensaio de acordo com NP EN 196-1	
		20%	d(50)=11 μm	-33%	-22%	1%		

5.2.3. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

A resistência aos cloretos pode ser medida usando vários ensaios, explicados sucintamente no capítulo 2. Por outro lado, este parâmetro também é influenciado pela idade em que a argamassa e/ou betão são ensaiados, bem como em que condições e tempo de cura até à realização do ensaio.

Tabela 5.3 - Desempenho da resistência à penetração de cloretos de betões ou argamassas com adição de GP obtidos por vários autores.

Autores	Material	Porcentagem de substituição	Dimensão das partículas GP	Resistência à penetração de cloretos			Observações
				220 dias	380 dias	381 dias C	
Shayan & Xu (2006)	Betão	20%	d(90)=10µm	35%	23%	70%	Ensaio RCP; 220 dias e 380 dias correspondem ao ensaio realizado nessas idades em prismas; 380 dias C corresponde ao ensaio realizado aos 380 dias de idade em cilindros.
		30%		59%	46%	55%	
Jain & Neithalath (2010)	Betão	10%	21 µm	10%	13%	14%	NT Build 492, na qual se baseia a especificação LNEC E-463. A dimensão das partículas corresponde à dimensão média.
		20%		8%	47%	45%	
		10%	21 µm	0%	-5%	0%	RCP (ASTM C 1202). A dimensão das partículas corresponde à dimensão média.
		20%		-80%	31%	41%	
Schwarz et al (2008)	Betão	10%	d(50)=20µm	28 dias	56 dias	90 dias	Ensaio RCP (ASTM 1202).
			d(90)=100µm	10%	30%	16%	
Ana Matos (2010)	Argamassa	10%	d(10)=2µm	41%			Ensaio segundo LNEC e-463, após 2 meses em cura húmida a 20°C e HR=99%.
		20%	d(50)=11µm d(90)=34µm	52%			

Em termos gerais, os betões e/ou argamassas contendo GP como substituto parcial de cimento, foram mais resistentes ao ataque por cloretos.

Apenas Jain & Neithalath (2010) realizaram o ensaio da NT Build 492, como no presente estudo, porém foi realizado em betão. Estes autores obtiveram melhorias semelhantes no que se refere ao GP 20 para 56 dias (idade mais próxima de 2 meses). No caso do GP10 o desempenho não foi tão optimista como o determinado neste trabalho.

5.2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água por capilaridade foi difícil de comparar devido à escassez de resultados encontrados, sendo que os autores referidos seguiram-se por outras normas e não pelas recomendações RILEM. Mesmo assim apresentam-se alguns resultados na tabela seguinte.

Tabela 5.4 - Desempenho da resistência absorção de água de betões ou argamassas com adição de GP obtidos por vários autores.

Autores	Material	Percentagem de substituição	Dimensão das partículas GP	Absorção de água (S)		Observações
				4horas	672horas	
Schwarz et al (2008)	Betão	10%	d50=20µm	30% ⁽¹⁾	90% ⁽¹⁾	⁽¹⁾ após 14 dias de cura ⁽²⁾ após 90 dias de cura
			d90=100µm	-27% ⁽²⁾	-18% ⁽²⁾	
Taha & Nounu (2008)	Betão	20%	45µm	Praticamente igual à do betão de controlo		BS 1881 Part 122: Testing concrete. Method for determination of water absorption.
Ana Matos (2010)	Argamassa	10%	d10=2µm	1%		Ensaio de acordo com recomendações RILEM e LNEC. Absorção às 4h30. Cerca de 3 meses de cura húmida.
		20%	d50=11µm d90=34µm	-1%		

Como se pode aferir os resultados para a absorção teve resultados diferentes, e também as condições de cada ensaio o são. Schwarz et al. (2008) concluíram que para um período de cura maior o CTL comporta-se melhor do que o betão com adições. Os resultados destes autores não estão em unanimidade com os obtidos neste estudo, porém não pode desprezar-se que foram realizados em betão e não em argamassas.

5.2.5. EXPANSÃO DEVIDO À ASR

A expansão ASR pode ser medida usando vários ensaios, caracterizados sumariamente no Capítulo 2. A validação deste parâmetro centrou-se mais em comparação com estudos onde foi realizado o ensaio ASTM C 1260, por ser este o que foi aqui adoptado, apresentando-se contudo outros resultados onde foram realizados outros ensaios. Para uma melhor comparação apresentam-se também as expansões obtidas por outros autores.

Tabela 5.5 - Desempenho relativo à ASR (em termos de expansão) de betões ou argamassas com adição de GP obtidos por vários autores.

Autores	Material	Percentagem de substituição	Dimensão das partículas GP	Na ₂ O _{eq} (GP)	Expansão ASR		Observações
Shayan & Xu (2004)	Argamassa	20%	d(88)=10µm	14%	-84% (e=0,0114%)		RILEM AAR-3 (38°C e HR=100%). Expansão para cerca de 400 dias.
		30%			-94% (e=0,0140%)		
		20%			-50% (e=0,0200%)		RILEM AAR-3 (38°C e HR=100%), usando cimento com baixo teor de álcali e agregados reactivos. Expansão após 400 dias.
		30%			-69% (e=0,0300%)		
Shayan & Xu (2006)	Betão	20%	d(90)=10µm	18%	0%(e=0,0030%)		Ensaio baseado no RILEM AAR-4; a expansão após 400 dias.
		30%			-133% (e=0.0100%)		
Schwarz et al (2008)	Argamassas	5%	d(50)=20µm	14%	14 dias	21 dias	Ensaio segundo ASTM C 1260. Os valores da expansão foram sempre inferiores ao controlo.
		10%	d(90)=100µm		e=0,2000%	e=0,245%	
		20%			e=0,1682%	e=0,2045%	
					e=0,1341%	e=0,1591%	
Taha & Nounu (2008)	Betão	20%	45µm	14%	79% (e=0.1500%)		Norma Britânica BS812 parte 123:1999. O ensaio usa 4 prismas de betão de dimensões 75x75x279 mm. os provetes são colocados numa câmara com temperatura controlada a 38 ± 2°C. Expansão após 1 ano.
Sacanni & Bignozzi (2010)	Argamassa	10%	d(10)=118µm	14%	e=0,09%		ASTM C 1260 (neste caso foi substituído agregado e não cimento). Expansões ao fim de 14 dias.
		25%	d(50)=605µm		e=0,06%		
		35%	d(90)=1421µm		e=0,06%		
Ana Matos (2010)	Argamassa	10%	d(10)=2µm	17%	26%	(e=0,13045%)	Ensaio segundo ASTM C 1260. Expansão ao fim de 14 dias.
		20%	d(90)=34µm		77%	(e=0,04100%)	

Como se pode observar, a incorporação de GP em argamassas e betões acarretou melhorias bastantes significativas no que se refere à expansão ASR, excepto para *Shayan & Xu*. Estes autores seguiram o ensaio do RILEM, cujas condições são diferentes do ensaio acelerado da barra de argamassa da ASTM C 1260, e nestes casos o betão com adição de GP foi bastante mais expansivo do que o betão sem adições. Porém essas expansões foram deveras reduzidas. Pensa-se que a diferença de desempenho do

GP face a ASR, destes autores para os restantes, se deverá às condições de ensaio ou ao teor em álcali equivalente. Porém no presente estudo o GP também é bastante alcalino.

Os resultados de *Schwarz et al.* (2008) são os que podem ter uma comparação mais fiável, pois usaram a mesma percentagem de substituição de cimento por GP, bem como o mesmo ensaio. Para GP10 e GP20, estes autores obtiveram expansões mais elevadas, principalmente no que se refere ao GP20. Isto pode dever-se à diferença granulometria das partículas, já que o GP por eles usado tem dimensão (d(90)) bastante superior.

Sacanni & Bignozzi (2010) também realizaram um estudo muito idêntico a este, mas substituindo agregado (daí a maior granulometria das partículas de vidro), mas com expansões são próximas das obtidas nesta investigação.

5.3. CONCLUSÕES GERAIS

Para a análise final de resultados, é apresentada a Tabela 5.6 com o desempenho dos provetes. Também são apresentados os mesmos resultados graficamente na Figura 5.1 para uma melhor percepção.

Em termos gerais pode concluir-se:

→ Os resultados das análises químicas disponíveis, mostraram que o GP possui uma quantidade elevada de álcali, cerca de 17%, o que ultrapassa completamente os limites estipulados. De qualquer forma não houve problemas expansivos no que diz respeito à ASR, segundo o ensaio realizado

→ No que se refere às resistências mecânicas, o uso de GP como substituição parcial de cimento resulta numa perda de resistência, que diminui à medida que aumenta a idade dos provetes. Nas primeiras idades a diminuição de resistência é bastante notória, cerca de 19% e 33% nas argamassas GP 10 e GP20, respectivamente. Porém, esta diminuição de resistência diminui bastante à medida que os provetes têm mais idade. Os limites mínimos exigidos de resistências mecânicas são geralmente respeitados. Esta tendência verificou-se também em estudos realizados por outros autores;

→ No que se refere à carbonatação, este parâmetro foi deveras o ponto fraco deste material, uma vez que o seu desempenho se mostrou muito aquém comparando com as argamassas CTL;

→ O ataque por cloretos mostrou-se inferior quando as argamassas continham adição de GP, sendo o coeficiente de difusão de cloretos cerca de metade do CTL nas argamassas GP20. As argamassas GP10 também mostraram melhor comportamento do que o CTL, mas com uma melhoria inferior às anteriores. Outras investigações realizadas também demonstraram a melhoria deste parâmetro, embora nem sempre seguindo os mesmos ensaios;

→ A expansão ASR, que à partida seria um ponto reticente, foi bastante inferior nas argamassas incorporando resíduos de vidro moídos. A expansão foi inferior cerca de 77% nos provetes GP20 e 26% nos GP10. Este resultado já era esperado mediante resultados anteriores e também foi comprovado comparando com outros autores que realizaram o mesmo ensaio;

→ Relativamente à absorção de água por capilaridade, foi bastante semelhante nos provetes GP's e CTL, tanto ao nível do coeficiente de absorção como ao nível da absorção ao longo do tempo, ou seja, as rectas são muito idênticas. Os resultados de *Schwarz et al.* (2008) não vão de encontro a estes.

Note-se que não é comum obterem-se pior desempenho em termos de resistências quando se utiliza sílica de fumo. De facto a sílica de fumo, em geral, acarreta melhorias de resistência logo aos primeiros dias o que não se verificou. Em termos de carbonatação, embora existam resultados

contraditórios, em geral os betões com sílica de fumo carbonatam um pouco mais do que os correspondentes sem sílica de fumo, para razões de água/cimento inferiores a 0,6 (Fidjestol & Lewis, 1998)

Tabela 5.6 – Comparação geral dos resultados obtidos.

	CTL	SF	GP10	GP20	Normas Associadas
R7 (MPa)	44,75	39,58	36,35	29,79	NP EN 197-1 NP 4220
Desempenho	-	-12%	-19%	-33%	
R28 (MPa)	53,29	52,50	47,05	41,73	
Desempenho	-	-1%	-12%	-22%	
Respeita as Normas	OK	OK	OK ⁽¹⁾	KO	
R90 (MPa)	53,63	60,58	50,82	54,27	
Desempenho	-	13%	-5%	1%	
Respeita as Normas	OK	OK	OK	OK	
R180 (MPa)	57,53	60,00	52,34	52,63	
Desempenho	-	4%	-9%	-9%	
Carbonatação (mm)	1,30	3,29	3,20	3,32	LNEC E-391
	3,01	7,25	4,91	7,94	
Desempenho	-	-153%	-146%	-155%	
	-	-141%	-63%	-164%	
Dns ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	16,17	9,01	9,52	7,81	LNEC E-463 ENV 206
Desempenho	-	44%	41%	52%	
Respeita as Normas		OK	OK	OK	
ASR (%)	0,1771	0,0344	0,13045	0,041	LNEC E- 461 ASTM C 1260
Desempenho	-	81%	26%	77%	
Respeita as Normas	KO	OK	OK ⁽²⁾	OK	
S ($\text{mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$)	0,0477	0,0395	0,0471	0,048	RILEM TC 116-PCD LNEC E-393
Desempenho	-	17%	1%	-1%	
Respeita as Normas⁽³⁾	OK	OK	OK	OK	
Análises Químicas*			Respeita as Normas		NP EN 196-2 NP 4220
Perda ao fogo			0,92%	OK	
Cloretos			<0,005	OK	
Trióxido de enxofre (SO ₃)			<0,05	OK	
Álcalis (expressos em Na ₂ Oeq)			17%	KO	
Óxido de cálcio reactivo					
Óxido de cálcio livre			8,70%	KO	
Pozolanicidade			Positivo	OK	

(1) Não respeita o índice de actividade exigido na NP 4220.

(2) Considerado expansivo, pois a expansão é superior a 0.10%, no entanto é inferior a 0.20%.

(3) Não é uma norma mas sim uma classificação segundo alguns autores em função do valor do coeficiente de absorção S. Neste caso as argamassas são de qualidade elevada.

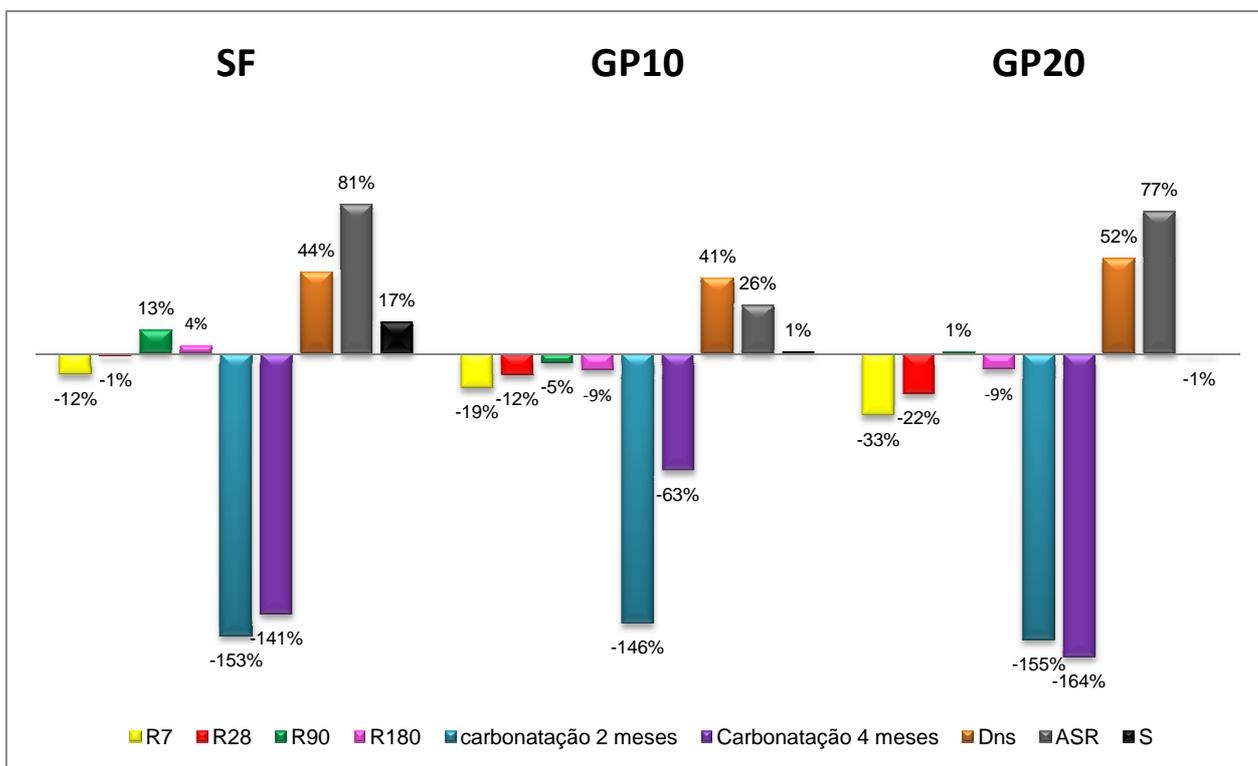


Figura 5.1 - Comparação geral de resultados.

5.4. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nos pontos seguintes são destacadas algumas das questões mais importantes a abordar em desenvolvimentos futuros na investigação do GP incluída em betões:

- Repetir ensaios de carbonatação, já que não foram positivos e também porque não foram validados;
- Utilizar uma moagem mais fina de forma a maximizar os efeitos pretendidos pelo GP;
- Utilizar e mesa vibratória para os provetes cilíndricos, devido ao elevado peso do molde, para obter uma compactação homogénea em todos os provetes;
- Fazer um novo programa experimental testando percentagens intermédias às efectuadas neste, por exemplo, 5% e 15%.
- Retirar do aumento da trabalhabilidade adquirida com o uso deste material, por exemplo, fazendo um estudo com diminuição da trabalhabilidade da água de amassadura.
- Reavaliar um programa de ensaios equivalente ao realizado, com controlo de todos os parâmetros em laboratório que conduza a uma composição adequada e levando a cabo uma betonagem não desfasada no tempo de todas as peças, com vista, não só, às melhorias que podem advir, mas também procurando a definição de custos inerentes à sua aplicação.
- Estudo da utilização de GP como adição em BAC, devido aos seus efeitos benéficos na trabalhabilidade.

→ Levar a cabo programas de ensaio mais vastos que englobem a determinação da influência da GP por exemplo na fluência e retracção do betão e por exemplo noutros aspectos relacionados com a durabilidade tais como o ataque de sulfatos.

No caso da industrialização da GP, os principais custos inerentes estarão relacionados principalmente a moagem do GP, na medida em que o custo da matéria-prima mais económico do que um cimento, já que o GP é um subproduto industrial, embora algumas vezes reaproveitado para formar novo vidro, pode também terminar num aterro. Assim sendo, também será interessante experimentar uma moagem mais baixa (por exemplo 27 horas) e verificar se com esta os resultados obtidos já serão satisfatórios.

Deve salientar-se que na moagem do GP foi usado um moinho de bolas, e no caso da sua industrialização como pozolana, será de esperar o uso de um moinho mais sofisticado e eficiente, alcançando uma moagem de mais material em menos tempo e obtendo dimensões menores.

5.5. BIBLIOGRAFIA

Fidjestöl, P. e Lewis, R.. *Microsílica as an addition, Chapt. 12, Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Fourth Edt., Ed. By Peter C. Hewlett, Arnold, 1998.

ANEXOS

ANEXO A

Trabalhabilidades das argamassas realizadas

Moldagem para o ensaio da carbonatação

Argamassas	Diâmetros (mm)			Média	Desvio padrão
CTL	199	200	200	200	0,58
GP10	205	204	206	205	1,00
GP20	205	205	206	205	0,58
SF	197	197	196	197	0,58

Moldagem para o ensaio de resistência aos 180 dias

Argamassas	Diâmetros (mm)			Média	Desvio padrão
CTL	199	200	201	200	1,00
GP10	202	204	202	202	1,15
GP20	204	204	202	204	1,15
SF	196	197	197	197	0,58

Moldagem para o ensaio de resistência aos 90 dias

Argamassas	Diâmetros (mm)			Média	Desvio padrão
CTL	202	199	200	200	1,53
GP10	204	203	203	203	0,58
GP20	205	207	205	205	1,15
SF	198	199	197	198	1,00

Moldagem para o ensaio de resistência aos 28 dias

Argamassas	Diâmetros (mm)			Média	Desvio padrão
CTL	199	200	198	199	1,00
GP10	207	201	204	204	3,00
GP20	205	205	207	205	1,15
SF	200	199	199	199	0,58

Moldagem para o ensaio de resistência aos 7 dias

Argamassas	Diâmetros (mm)			Média	Desvio padrão
CTL	198	200	198	198	1,15
GP10	201	204	205	204	2,08
GP20	205	205	206	205	0,58
SF	197	195	195	195	1,15

Moldagem para os ensaios de cloretos e ASR

Argamassas	Diâmetros (mm)			Média	Desvio padrão
CTL	200	200	198	198	1,15
GP10	204	204	205	204	2,08
GP20	205	205	206	205	0,58
SF	197	197	195	197	0,58

Moldagem para o ensaio de Capilaridade

Argamassas	Diâmetros (mm)			Média	Desvio padrão
GP10	206	207	207	207	0,58
GP20	210	210	208	210	1,15
CTL	200	200	199	200	0,58
SF	199	200	195	199	2,65

ANEXO B
Resistências mecânicas aos
7 dias

	CTL	SF	GP10	GP20				
Peso (g)	594	563	584	569				
	585	564	582	564				
	581	564	574	563				
Média	587	564	580	565				
Resistência Flexão (KN)	2,79	2,50	2,40	2,30				
	2,67	2,39	2,32	2,25				
	2,74	2,45	2,39	3,10				
Média	2,73	2,45	2,37	2,55				
Desvio Padrão	0,06	0,06	0,04	0,48				
Resistência Flexão (MPa)	6,54	5,86	5,63	5,39				
	6,26	5,60	5,44	5,27				
	5,80	5,74	5,60	5,42				
Média	6,20	5,73	5,56	5,36				
Desvio Padrão	0,37	0,13	0,10	0,08				
Resistência compressão (KN)	71,29	68,77	67,96	61,45	55,63	56,16	49,24	45,22
	67,12	74,68	66,78	66,97	57,11	57,91	42,54	43,12
	73,43	74,20	53,23	63,59	60,14	62,05	51,61	49,45
Média	71,58	63,33	58,17	46,86				
Desvio Padrão	3,09	5,52	2,47	3,75				
Resistência compressão (MPa)	44,56	42,98	42,47	38,41	34,77	35,11	30,78	28,26
	41,95	46,68	41,74	41,86	35,69	36,16	26,56	29,95
	45,95	46,40	33,27	39,74	37,59	38,78	32,26	30,91
Média	44,75	39,58	36,35	29,79				
Desvio Padrão	1,94	3,45	1,55	2,06				

ANEXO C
Resistências mecânicas aos
28 dias

	CTL		SF		GP10		GP20	
Peso (g)	587		560		577		566	
	583		561		585		577	
	582		548		579		569	
Média	584		556		580		571	
Resistência Flexão (KN)	3,40		2,96		3,10		2,73	
	3,33		2,97		2,90		2,79	
	3,35		3,21		3,20		3,06	
Média	3,36		3,05		3,07		2,86	
Desvio Padrão	0,04		0,14		0,15		0,18	
Resistência Flexão (MPa)	8,00		6,94		7,20		6,40	
	7,80		6,96		6,70		6,54	
	7,85		7,57		7,60		7,20	
Média	7,88		7,16		7,17		6,71	
Desvio Padrão	0,10		0,36		0,45		0,43	
Resistência compressão (KN)	80,22	83,85	90,14	81,64	75,90	74,23	64,83	71,95
	88,74	88,53	76,80	84,44	77,26	77,13	62,45	62,68
	84,98	85,12	82,25	88,41	75,35	71,80	68,64	70,02
Média	85,24		83,95		75,28		66,76	
Desvio Padrão	3,17		4,85		2,05		4,00	
Resistência compressão (MPa)	50,14	52,41	56,51	51,02	47,40	46,39	40,52	44,97
	55,46	55,53	48,00	52,77	48,29	48,21	39,09	39,17
	53,11	53,20	51,41	55,26	47,09	44,91	42,90	43,76
Média	53,31		52,50		47,05		41,74	
Desvio Padrão	2,02		3,08		1,27		2,49	

ANEXO D
Resistências mecânicas aos
90 dias

	CTL	SF	GP10	GP20				
Peso (g)	597	552	582	567				
	604	558	595	571				
	588	555	580	579				
Média	596	555	586	572				
Resistência Flexão (KN)	3,50	3,50	3,70	3,70				
	3,90	3,60	3,50	3,60				
	3,50	3,60	3,30	3,10				
Média	3,63	3,57	3,50	3,47				
Desvio Padrão	0,23	0,06	0,20	0,32				
Resistência Flexão (MPa)	8,14	8,20	8,60	8,60				
	9,10	8,30	8,10	8,40				
	8,30	8,30	7,60	7,40				
Média	8,51	8,27	8,10	8,13				
Desvio Padrão	0,51	0,06	0,50	0,64				
Resistência compressão (KN)	82,20	85,20	96,80	95,30	81,80	83,00	86,20	86,70
	85,20	82,20	93,20	101,80	80,30	81,00	86,70	88,10
	80,80	88,40	96,00	98,50	82,80	79,10	88,30	84,30
Média	84,00	96,93	81,33	86,72				
Desvio Padrão	2,79	2,95	1,50	1,45				
Resistência compressão (MPa)	51,40	53,30	60,50	59,50	51,10	51,80	53,90	54,20
	53,20	51,40	58,30	63,60	50,20	50,60	54,20	55,10
	50,50	55,30	60,00	61,60	51,70	49,50	55,20	53,00
Média	52,52	60,58	50,82	54,27				
Desvio Padrão	1,75	1,84	0,89	0,81				

ANEXO E
Resistências mecânicas aos
180 dias

	CTL		SF		GP10		GP20	
Peso (g)	587		559		582		582	
	582		561		590		573	
	585		552		561		582	
Média	585		557		578		579	
Resistência Flexão (KN)	3,33		3,21		3,60		3,60	
	3,17		3,56		3,53		3,59	
	3,41		3,00		3,40		3,69	
Média	3,30		3,26		3,51		3,63	
Desvio Padrão	0,12		0,28		0,10		0,06	
Resistência Flexão (MPa)	7,80		7,52		8,60		8,44	
	7,43		8,34		8,10		8,42	
	7,99		7,03		7,60		8,65	
Média	7,74		7,63		8,10		8,50	
Desvio Padrão	0,28		0,66		0,50		0,13	
Resistência compressão (KN)	90,21	86,80	92,87	88,04	81,70	79,93	82,92	90,58
	85,62	82,86	97,87	100,07	78,48	75,94	83,96	83,12
	104,64	102,11	89,30	93,99	93,74	92,63	84,39	82,22
Média	92,04		93,69		83,74		84,53	
Desvio Padrão	9,13		4,69		7,57		3,06	
Resistência compressão (MPa)	56,38	54,25	58,04	55,03	51,06	49,96	51,83	56,62
	53,51	51,81	61,17	62,54	49,05	47,47	52,00	51,20
	65,40	63,82	55,80	58,74	58,59	57,89	52,74	51,39
Média	57,53		60,00		52,34		52,63	
Desvio Padrão	5,70		2,93		4,73		2,03	

ANEXO F

Absorção de água por capilaridade

Provete	CTL1	CTL2	CTL3	SF1	SF2	SF3	GP10-1	GP10-2	GP10-3	GP20-1	GP20-2	GP20-3
forma	cilindro	cilindro	cilindro									
Área base (mm ²)	7854	7854	7854	7854	7854	7854	7854	7854	7854	7853,9816	7854	7854
Tempo												
09:00	887,33	888,27	892,83	840,66	832,20	835,10	847,84	852,11	860,87	869,31	878,21	864,45
09:05	888,71	889,27	894,23	842,41	833,91	836,76	848,92	853,45	862,17	870,86	879,62	865,95
09:10	889,25	889,63	894,69	842,84	834,35	837,20	849,24	853,83	862,55	871,30	880,02	866,34
09:20	890,04	890,19	895,36	843,47	835,05	837,80	849,83	854,47	863,18	872,08	880,70	867,01
09:30	890,64	890,55	895,82	843,91	835,54	838,25	850,28	855,00	863,69	872,64	881,18	867,57
10:00	891,93	891,35	896,77	844,84	836,50	839,20	851,38	856,16	864,69	873,81	882,22	868,77
10:30	892,85	891,80	897,36	845,42	837,06	839,73	852,08	856,89	865,29	874,53	882,85	869,53
11:00	893,55	892,16	897,82	845,83	837,45	840,12	852,63	857,40	865,72	875,04	883,29	870,05
11:30	894,14	892,41	898,20	846,12	837,72	840,43	853,08	857,44	866,08	875,42	883,62	870,44
13:00	895,52	893,15	899,17	846,73	838,30	841,07	854,11	858,82	866,88	876,30	884,34	871,36
13:30	895,83	893,30	899,38	846,88	838,42	841,18	854,30	859,01	867,06	876,48	884,48	871,54
09:00	901,61	897,08	904,28	848,98	840,65	843,54	858,34	863,05	870,58	879,58	887,25	875,04

ANEXO G

Absorção de água por unidade de superfície ao longo do tempo

CTL1	CTL2	CTL3	SF1	SF2	SF3
887,33 0,00	888,27 0,00	892,83 0,00	840,66 0,00	832,20 0,00	835,10 0,00
888,71 0,18	889,27 0,13	894,23 0,18	842,41 0,22	833,91 0,22	836,76 0,21
889,25 0,24	889,63 0,17	894,69 0,24	842,84 0,28	834,35 0,27	837,20 0,27
890,04 0,35	890,19 0,24	895,36 0,32	843,47 0,36	835,05 0,36	837,80 0,34
890,64 0,42	890,55 0,29	895,82 0,38	843,91 0,41	835,54 0,43	838,25 0,40
891,93 0,59	891,35 0,39	896,77 0,50	844,84 0,53	836,50 0,55	839,20 0,52
892,85 0,70	891,80 0,45	897,36 0,58	845,42 0,61	837,06 0,62	839,73 0,59
893,55 0,79	892,16 0,50	897,82 0,64	845,83 0,66	837,45 0,67	840,12 0,64
894,14 0,87	892,41 0,53	898,20 0,68	846,12 0,70	837,72 0,70	840,43 0,68
895,52 1,04	893,15 0,62	899,17 0,81	846,73 0,77	838,30 0,78	841,07 0,76
895,83 1,08	893,30 0,64	899,38 0,83	846,88 0,79	838,42 0,79	841,18 0,77
901,61 1,82	897,08 1,12	904,28 1,46	848,98 1,06	840,65 1,08	843,54 1,07
GP10-1	GP10-2	GP10-3	GP20-1	GP20-2	GP20-3
847,84 0,00	852,11 0,00	860,87 0,00	869,31 0,00	878,21 0,00	864,45 0,00
848,92 0,14	853,45 0,17	862,17 0,17	870,86 0,20	879,62 0,18	865,95 0,19
849,24 0,18	853,83 0,22	862,55 0,21	871,30 0,25	880,02 0,23	866,34 0,24
849,83 0,25	854,47 0,30	863,18 0,29	872,08 0,35	880,70 0,32	867,01 0,33
850,28 0,31	855,00 0,37	863,69 0,36	872,64 0,42	881,18 0,38	867,57 0,40
851,38 0,45	856,16 0,52	864,69 0,49	873,81 0,57	882,22 0,51	868,77 0,55
852,08 0,54	856,89 0,61	865,29 0,56	874,53 0,66	882,85 0,59	869,53 0,65
852,63 0,61	857,40 0,67	865,72 0,62	875,04 0,73	883,29 0,65	870,05 0,71
853,08 0,67	857,44 0,68	866,08 0,66	875,42 0,78	883,62 0,69	870,44 0,76
854,11 0,80	858,82 0,85	866,88 0,77	876,30 0,89	884,34 0,78	871,36 0,88
854,30 0,82	859,01 0,88	867,06 0,79	876,48 0,91	884,48 0,80	871,54 0,90
858,34 1,34	863,05 1,39	870,58 1,24	879,58 1,31	887,25 1,15	875,04 1,35

ANEXO H

Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário

Provete	Data Ensaio	Canal C	U (V)	Carga passada (Coulombs)	Ti (°C)	Tf (°C)	Tm (°C)
CTL - 1	25-02-10	C1	20	5929	22	26	24,0
CTL - 2	25-02-10	C2	20	5885	20	26	23,0
CTL - 3	26-02-10	C1	20	4291	22	26	24,0
SF - 1	02-03-10	C4	60	3136	20	26	23,0
SF - 2	02-03-10	C5	60	3251	20	26	23,0
SF - 3	02-03-10	C6	60	3224	20	25	22,5
GP10 - 1	25-02-10	C3	20	3099	20	26	23,0
GP10 - 2	26-02-10	C1	20	5151	21	2	11,5
GP10 - 3	26-02-10	C3	20	5565	21	23	22,0
GP20 - 1	02-03-10	C1	60	2820	21	27	24,0
GP20 - 2	02-03-10	C2	60	3072	20	26	23,0
GP20 - 3	02-03-10	C3	60	2652	20	26	23,0

Leituras								D_{ns} ($10^{-12}m^2/s$)	$D_{ns_{med}}^{med}$ ($10^{-12}m^2/s$)	médio
X_{d6}	X_{d4}	X_{d2}	X_{d1}	X_{d3}	X_{d5}	X_{d7}	$X_{d_{med}}$ (mm)			
21,60	30,40	31,40	31,40	28,45	27,95	20,90	27,4	19,6	16,2	3,1
19,90	22,10	20,95	22,25	28,25	20,30	18,65	21,8	15,2		
15,50	19,65	20,10	21,05	20,00	20,25	21,35	19,7	13,7		
13,80	14,30	11,65	11,20	13,60	14,10	13,75	13,2	8,8	9,0	2,8
11,10	10,50	9,85	9,20	8,85	9,90	9,65	9,9	6,3		
15,30	17,50	19,35	17,10	19,60	17,30	15,95	17,4	11,9		
12,85	16,30	18,45	19,60	20,25	20,65	20,50	18,4	12,6	9,5	2,9
15,05	14,15	14,90	10,63	15,30	14,20	13,90	14,0	9,1		
9,85	8,55	9,80	9,75	10,70	13,45	12,30	10,6	6,9		
10,80	10,25	9,85	9,30	10,30	10,00	10,75	10,2	6,6	7,8	2,8
10,60	10,50	8,90	7,55	8,80	8,85	9,60	9,3	5,9		
17,50	18,10	17,45	16,50	15,70	15,40	12,45	16,2	11,0		

ANEXO I – Expansões ASR ao longo de 14 dias

Data das leituras	CTL 1			CTL 2			SF 1			SF 2			GP10 1			GP10 2			GP20 1			GP20 2		
	Leituras	Lx	L	Leituras	Lx	L	Leituras	Lx	L	Leituras	Lx	L	Leituras	Lx	L	Leituras	Lx	L	Leituras	Lx	L	Leituras	Lx	L
3-Mar																								
4-Mar	-2,838	-2,848		-2,974	-2,977		-2,366	-2,376		-2,303	-2,299		-2,200	-2,203		-2,532	-2,533		-2,489	-2,491		-2,333	-2,347	
	-2,848			-2,973			-2,377			-2,297			-2,204			-2,538			-2,494			-2,347		
	-2,852			-2,978			-2,389			-2,293			-2,206			-2,528			-2,490			-2,359		
	-2,852			-2,981			-2,370			-2,301			-2,202			-2,535			-2,490			-2,348		
5-Mar	-2,754	-2,760		-2,886	-2,890		-2,263	-2,269		-2,202	-2,203													
	-2,761			-2,889			-2,274			-2,202														
	-2,762			-2,889			-2,269			-2,197														
	-2,761			-2,895			-2,268			-2,212														
8-Mar	-2,637	-2,655	0,042	-2,807	-2,809	0,032	-2,209	-2,217	0,021	-2,147	-2,146	0,023	-2,126	-2,128	0,030	-2,482	-2,478	0,022	-2,479	-2,483	0,003	-2,326	-2,339	0,003
	-2,654			-2,807			-2,216			-2,145			-2,128			-2,485			-2,487			-2,339		
	-2,663			-2,810			-2,229			-2,140			-2,129			-2,469			-2,479			-2,351		
	-2,665			-2,812			-2,214			-2,153			-2,129			-2,476			-2,488			-2,339		
9-Mar	-2,631	-2,638	0,049	-2,754	-2,760	0,052	-2,195	-2,204	0,026	-2,148	-2,148	0,022	-2,080	-2,083	0,048	-2,449	-2,448	0,034	-2,430	-2,435	0,023	-2,281	-2,295	0,021
	-2,643			-2,758			-2,205			-2,146			-2,085			-2,453			-2,437			-2,292		
	-2,640			-2,761			-2,217			-2,141			-2,085			-2,440			-2,428			-2,308		
	-2,638			-2,766			-2,200			-2,155			-2,082			-2,449			-2,443			-2,297		
10-Mar	-2,572	-2,584	0,070	-2,735	-2,740	0,060	-2,174	-2,185	0,034	-2,143	-2,139	0,026	-2,059	-2,063	0,056	-2,424	-2,424	0,044	-2,436	-2,442	0,020	-2,295	-2,309	0,015
	-2,584			-2,738			-2,183			-2,140			-2,064			-2,430			-2,444			-2,309		
	-2,588			-2,741			-2,200			-2,136			-2,059			-2,415			-2,436			-2,318		
	-2,590			-2,745			-2,182			-2,137			-2,069			-2,425			-2,450			-2,314		
11-Mar	-2,546	-2,555	0,082	-2,705	-2,710	0,072	-2,173	-2,135	0,053	-2,126	-2,128	0,030	-1,998	-1,999	0,082	-2,380	-2,383	0,060	-2,431	-2,433	0,023	-2,294	-2,303	0,018
	-2,556			-2,710			-2,187			-2,127			-1,996			-2,389			-2,429			-2,303		
	-2,558			-2,711			-2,000			-2,123			-1,995			-2,379			-2,429			-2,317		
	-2,559			-2,714			-2,181			-2,135			-2,007			-2,384			-2,443			-2,296		
12-Mar	-2,508	-2,515	0,098	-2,668	-2,673	0,087	-2,184	-2,201	0,027	-2,162	-2,163	0,016	-2,006	-2,009	0,078	-2,364	-2,366	0,067	-2,400	-2,407	0,034	-2,263	-2,277	0,028
	-2,521			-2,670			-2,200			-2,162			-2,009			-2,370			-2,407			-2,278		
	-2,502			-2,674			-2,219			-2,157			-2,009			-2,360			-2,402			-2,293		
	-2,527			-2,679			-2,201			-2,170			-2,010			-2,370			-2,417			-2,273		
15-Mar	-2,383	-2,405	0,142	-2,552	-2,558	0,133	-2,172	-2,184	0,034	-2,121	-2,120	0,033	-1,925	-1,927	0,110	-2,298	-2,298	0,094	-2,374	-2,378	0,045	-2,219	-2,232	0,046
	-2,412			-2,558			-2,183			-2,119			-1,922			-2,302			-2,379			-2,234		
	-2,410			-2,560			-2,200			-2,114			-1,929			-2,291			-2,373			-2,246		
	-2,415			-2,563			-2,180			-2,127			-1,932			-2,300			-2,387			-2,227		
16-Mar	-2,350	-2,360	0,160	-2,528	-2,534	0,142	-2,192	-2,228	0,016	-2,161	-2,165	0,015	-1,880	-1,884	0,128	-2,273	-2,276	0,103	-2,384	-2,366	0,050	-2,234	-2,250	0,039
	-2,364			-2,531			-2,236			-2,166			-1,885			-2,281			-2,301			-2,249		
	-2,364			-2,537			-2,249			-2,161			-1,880			-2,269			-2,383			-2,263		
	-2,361			-2,540			-2,234			-2,173			-1,890			-2,279			-2,395			-2,253		
17-Mar	-2,336	-2,383	0,151	-2,494	-2,499	0,157	-2,138	-2,155	0,046	-2,105	-2,105	0,039	-1,862	-1,865	0,135	-2,242	-2,241	0,117	-2,365	-2,371	0,048	-2,231	-2,270	0,031
	-2,345			-2,497			-2,156			-2,105			-1,864			-2,240			-2,371			-2,245		
	-2,345			-2,499			-2,170			-2,098			-1,866			-2,235			-2,369			-2,355		
	-2,504			-2,504			-2,155			-2,112			-1,869			-2,247			-2,379			-2,249		
18-Mar	-2,345	-2,357	0,161				-2,310	-2,316	-0,019	-2,178	-2,178	0,010	-1,884	-1,877	0,130	-2,217	-2,229	0,122	-2,365	-2,370	0,048	-2,244	-2,245	0,041
	-2,357			-2,311			-2,178			-2,178			-1,877			-2,227			-2,373			-2,243		
	-2,359			-2,331			-2,171			-2,171			-1,874			-2,239			-2,368			-2,242		
	-2,366			-2,312			-2,183			-2,183			-1,873			-2,232			-2,373			-2,251		
19-Mar	-2,295	-2,306	0,182	-2,454	-2,458	0,173	-2,159	-2,174	0,038	-2,125	-2,126	0,031	-1,852	-1,860	0,137	-2,224	-2,224	0,124	-2,380	-2,384	0,043	-2,235	-2,248	0,039
	-2,306			-2,456			-2,179			-2,125			-1,862			-2,228			-2,384			-2,250		
	-2,308			-2,461			-2,180			-2,120			-1,860			-2,216			-2,381			-2,256		
	-2,314			-2,461			-2,179			-2,132			-1,867			-2,227			-2,392			-2,252		

Colocação em água
 Colocação em NaOH
 Erros de leitura



RESULTADOS DO AUTOCONTROLO
VALORES MÉDIOS

FÁBRICA: MACEIRA

BOLETIM Nº 11
DATA: 09.01.2009

REFERÊNCIA: Cimento * CEM I 42,5 R
Resultados Referentes a NOVEMBRO

ENSAIOS MECÂNICOS [NP EN 196-1]

IDADE	RESISTÊNCIAS (MPa)			
	FLEXÃO		COMPRESSÃO	
	MENSAL	ANUAL	MENSAL	ANUAL
2 dias	5,9	5,8	32,7	31,3
7 dias	7,5	7,5	44,8	44,3
28 dias	8,8	8,7	55,1	55,4

ANÁLISE QUÍMICA

			MENSAL	ANUAL
PERDA AO FOGO	%	P F	2,61	2,43
RESÍDUO INSOLÚVEL	%	R.I.	1,33	1,32
ÓXIDO DE SILÍCIO	%	SiO ₂	20,36	20,39
ÓXIDO DE ALUMÍNIO	%	Al ₂ O ₃	5,10	4,76
ÓXIDO DE FERRO	%	Fe ₂ O ₃	3,12	3,15
ÓXIDO DE CÁLCIO	%	CaO	62,72	62,17
ÓXIDO DE MAGNÉSIO	%	MgO	1,81	1,90
SULFATOS	%	SO ₃	3,44	3,44
ÓXIDO DE POTÁSSIO	%	K ₂ O		
ÓXIDO DE SÓDIO	%	Na ₂ O		
CLORETOS	%	Cl	0,0120	0,0137
CAL LIVRE	%		1,62	0,98
N/D (não Doseados)	%			

ENSAIOS FÍSICOS

		MENSAL	ANUAL
Peso Específico (g/cm ³)		3,14	3,15
Resíduo de Peneiração (%)	90 µm	0,06	0,17
	63 µm	0,20	0,62
	45 µm	1,75	2,28
	32 µm	5,40	7,50
Superfície Específica de Blaine (cm ² /g) [NP EN 196-6]		3928	3884
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		29,8	29,6
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	151	162
	Fim	198	217
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		1,19	1,18
Índice de Brancura (0 a 100)		29,66	29,49

OBSERVAÇÕES:

ANUAL - Valor médio dos últimos 12 meses

NOTA: todos os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam a [norma aplicada]

VISTO

APROVADO

Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno Moreira

Sample Source & type:

Sample bulk lot ref:

SOP Name:

Measured by:
snunes

Result Source:
Measurement

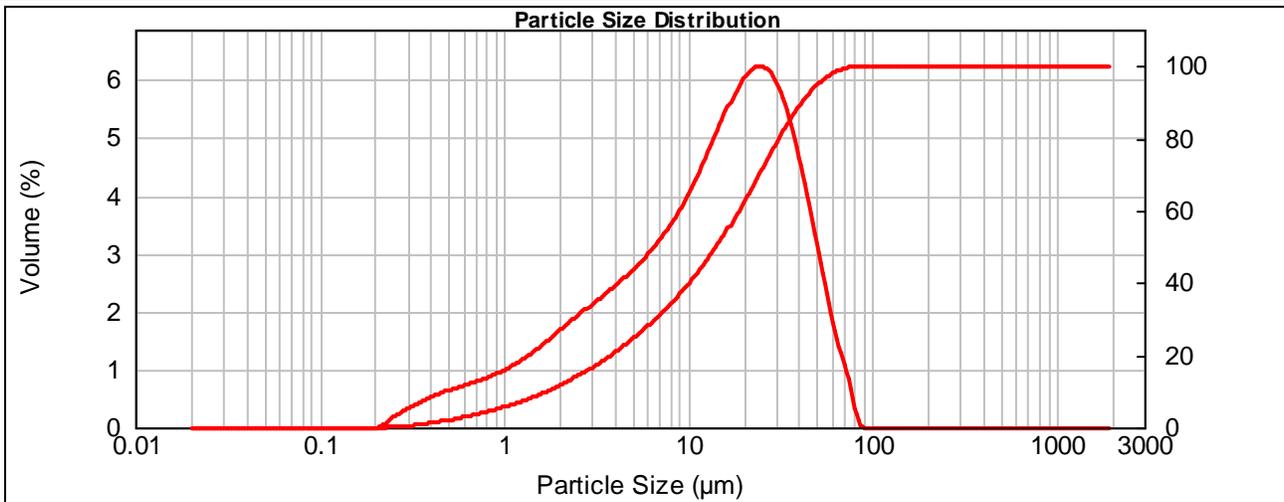
Measured:
segunda-feira, 27 de Abril de 2009 10:59:22

Analysed:
segunda-feira, 27 de Abril de 2009 10:59:23

Particle Name: Cement 1.0	Accessory Name: Hydro 2000S (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.680	Absorption: 1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 18.14 %
Dispersant Name: Ethanol	Dispersant RI: 1.360	Weighted Residual: 0.457 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0103 %Vol	Span : 2.793	Uniformity: 0.879	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.43 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.204 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 18.442 um	

d(0.1): 1.730 um d(0.5): 14.295 um d(0.9): 41.649 um



— Background com Ethanol - Nuno Moreira, segunda-feira, 27 de Abril de 2009 10:59:22

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.00	11.482	4.15	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.11	13.183	4.55	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.24	15.136	4.95	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.38	17.378	5.30	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.52	19.953	5.55	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.04	2.188	1.66	22.909	5.64	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.17	2.512	1.81	26.303	5.52	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.28	2.884	1.95	30.200	5.17	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.36	3.311	2.09	34.674	4.60	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.45	3.802	2.23	39.811	3.86	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.52	4.365	2.38	45.709	3.02	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.59	5.012	2.54	52.481	2.17	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.64	5.754	2.73	60.256	1.38	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.70	6.607	2.94	69.183	0.83	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.76	7.586	3.18	79.433	0.09	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.83	8.710	3.45	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.91	10.000	3.78	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925			

Operator notes:

Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno Moreira

SOP Name:

Measured:
quinta-feira, 16 de Julho de 2009 10:29:24

Sample Source & type:

Measured by:
snunes

Analysed:
quinta-feira, 16 de Julho de 2009 10:29:25

Sample bulk lot ref:

Result Source:
Measurement

Particle Name:
Cement 1.0

Accessory Name:
Hydro 2000S (A)

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Normal

Particle RI:
1.680

Absorption:
1

Size range:
0.020 to 2000.000 μm

Obscuration:
12.34 %

Dispersant Name:
Ethanol

Dispersant RI:
1.360

Weighted Residual:
0.225 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0733 %Vol

Span :
2.407

Uniformity:
0.749

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.14 m^2/g

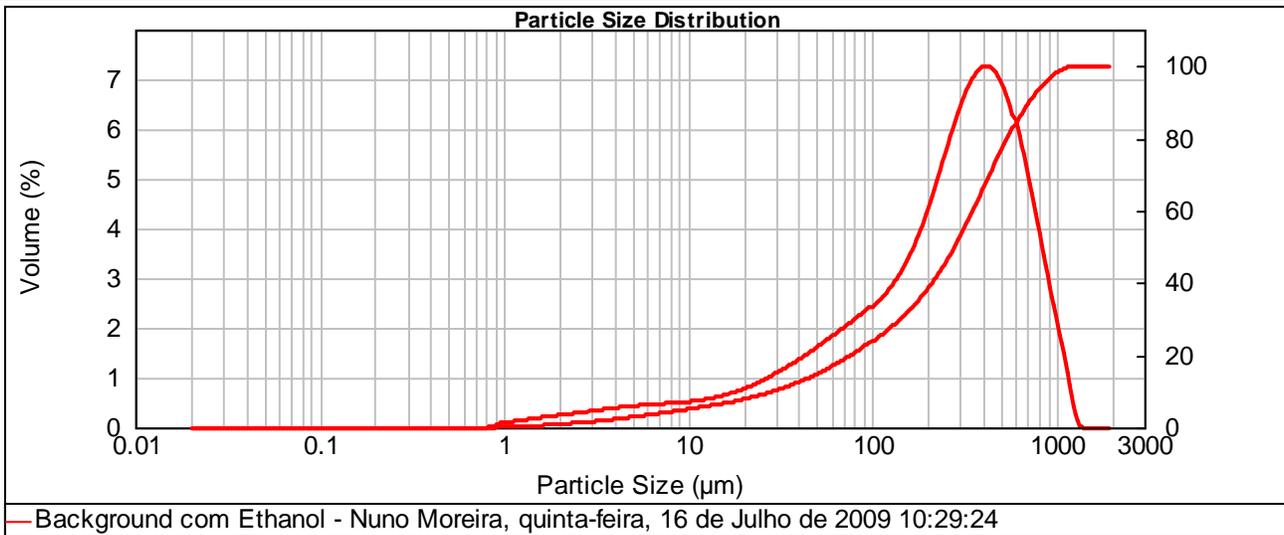
Surface Weighted Mean D[3,2]:
42.850 μm

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
328.869 μm

d(0.1): 28.982 μm

d(0.5): 280.878 μm

d(0.9): 705.091 μm



Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.12	11.482	0.50	120.226	2.60	1258.925	0.01
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.15	13.183	0.54	138.038	2.91	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.17	15.136	0.59	158.489	3.32	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.20	17.378	0.66	181.970	3.85	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.22	19.953	0.74	208.930	4.46	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.25	22.909	0.83	239.883	5.12	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.28	26.303	0.94	275.423	5.73	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.30	30.200	1.05	316.228	6.23	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.33	34.674	1.17	363.078	6.52	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.35	39.811	1.30	416.869	6.53	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.38	45.709	1.43	478.630	6.22	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.40	52.481	1.57	549.541	5.62	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.41	60.256	1.72	630.957	4.78	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.43	69.183	1.87	724.436	3.79	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.44	79.433	2.02	831.764	2.75	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.03	8.710	0.45	91.201	2.18	954.993	1.78	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.09	10.000	0.47	104.713	2.36	1096.478	0.80		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925			

Operator notes:

Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno Moreira

Sample Source & type:

Sample bulk lot ref:

SOP Name:

Measured by:
snunes

Result Source:
Measurement

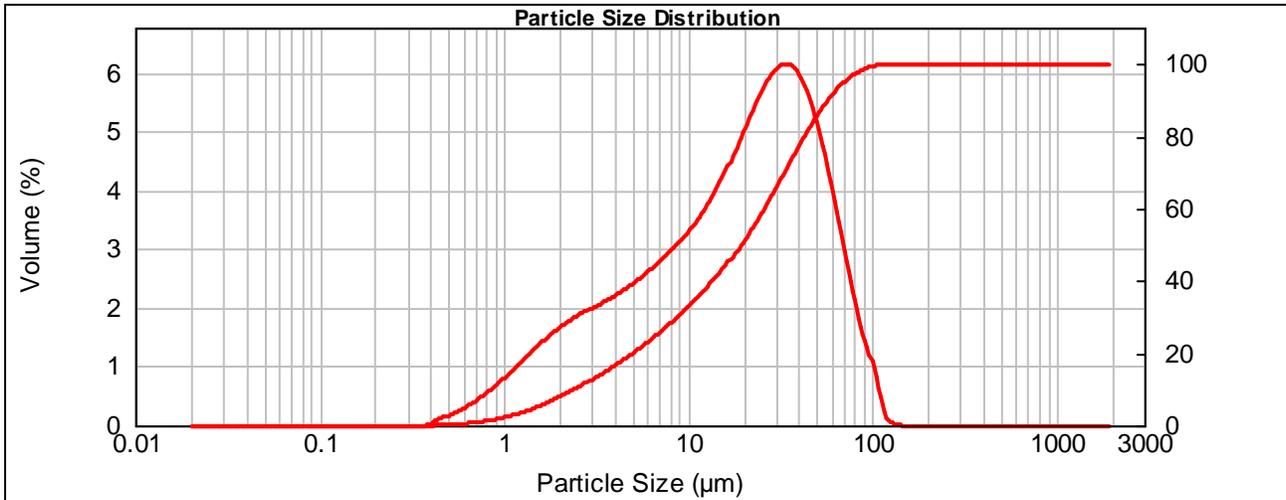
Measured:
quinta-feira, 16 de Julho de 2009 10:49:57

Analysed:
quinta-feira, 16 de Julho de 2009 10:49:59

Particle Name: Cement 1.0	Accessory Name: Hydro 2000S (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.680	Absorption: 1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 13.67 %
Dispersant Name: Ethanol	Dispersant RI: 1.360	Weighted Residual: 0.519 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0121 %Vol	Span : 2.848	Uniformity: 0.899	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.913 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 6.571 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 25.399 um	

d(0.1): 2.428 um d(0.5): 19.431 um d(0.9): 57.764 um



— Background com Ethanol - Nuno Moreira, quinta-feira, 16 de Julho de 2009 10:49:57

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.91	11.482	3.30	120.226	0.03	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.07	13.183	3.59	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.23	15.136	3.93	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.38	17.378	4.32	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.51	19.953	4.71	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.62	22.909	5.09	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	1.73	26.303	5.38	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	1.82	30.200	5.54	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	1.91	34.674	5.50	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	2.01	39.811	5.24	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.10	4.365	2.12	45.709	4.76	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.17	5.012	2.24	52.481	4.09	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.25	5.754	2.38	60.256	3.29	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.35	6.607	2.52	69.183	2.47	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.47	7.586	2.68	79.433	1.66	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.60	8.710	2.86	91.201	1.07	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.75	10.000	3.06	104.713	0.32	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

Operator notes:

Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno Moreira

Sample Source & type:

Sample bulk lot ref:

SOP Name:

Measured by:
snunes

Result Source:
Measurement

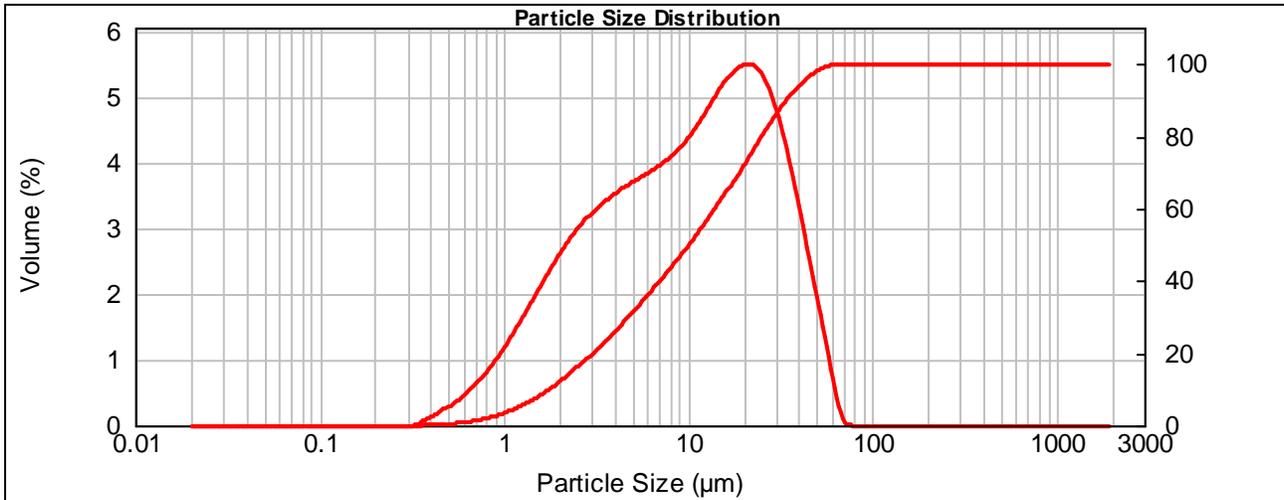
Measured:
quinta-feira, 16 de Julho de 2009 10:42:59

Analysed:
quinta-feira, 16 de Julho de 2009 10:43:01

Particle Name: Cement 1.0	Accessory Name: Hydro 2000S (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.680	Absorption: 1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 15.05 %
Dispersant Name: Ethanol	Dispersant RI: 1.360	Weighted Residual: 0.475 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0092 %Vol	Span : 3.174	Uniformity: 0.998	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.33 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.524 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 14.515 um	

d(0.1): 1.776 um d(0.5): 10.186 um d(0.9): 34.108 um



— Background com Ethanol - Nuno Moreira, quinta-feira, 16 de Julho de 2009 10:42:59

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.35	11.482	4.27	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.61	13.183	4.52	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.87	15.136	4.76	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	2.13	17.378	4.98	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	2.37	19.953	4.86	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	2.59	22.909	4.56	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.79	26.303	4.06	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.96	30.200	3.41	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	3.09	34.674	2.67	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.10	3.802	3.21	39.811	1.91	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.18	4.365	3.31	45.709	1.17	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.28	5.012	3.49	52.481	0.37	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.39	5.754	3.59	60.256	0.01	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.53	6.607	3.71	69.183	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.69	7.586	3.85	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.89	8.710	4.05	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	1.11	10.000		104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226	0.00	1258.925	0.00		

Operator notes:

CTCV - Medição e Ensaio
Laboratório de Análise de Materiais

RELATÓRIO Nº 311.1309/10
Refª amostra 2010.21.3559/DV

Cliente UNIVERSIDADE DO PORTO - FACULDADE DE ENGENHARIA Processo nº 311.16056
Endereço 4050-123 PORTO Data de entrada 19.05.10
Material Diverso
Refª cliente GP48 + CEMI Data de execução 2.06 a 16.06.10

ENSAIO DE POZOLANICIDADE - NP EN 196-5

PE CTCV	Parâmetro Analítico	Valor obtido	Unidades	Método Analítico
1.1.324	CaO	4,6	mmol/l	Volumetria
"	OH ⁻	70	mmol/l	"

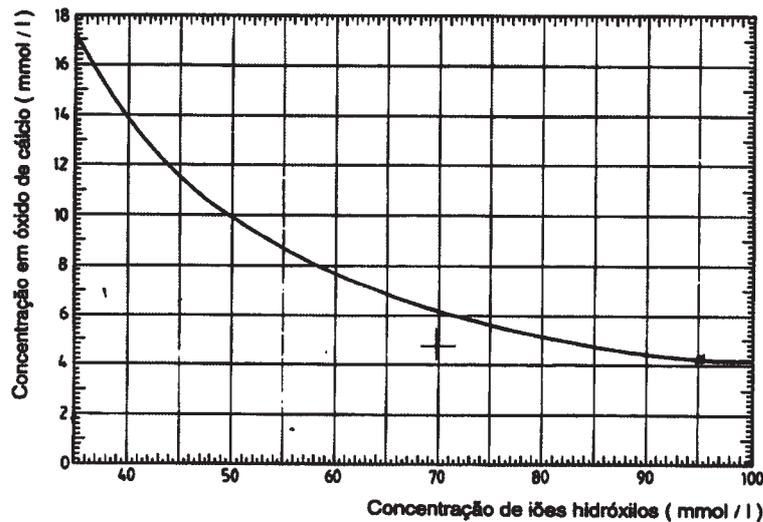


Figura 1 Diagrama para a determinação da pozolanicidade

Interpretação de resultados: O cimento satisfaz ao ensaio de pozolanicidade se o ponto se situar abaixo da curva de concentração de saturação em óxido de cálcio da figura 1.

Observações :

- Amostragem: - Sob a responsabilidade do cliente.
- Preparação da amostra: - De acordo com NP EN 196-5⁽¹⁾

⁽¹⁾ Realizado sobre uma amostra constituída por 90% de cimento CEM I e 10% de amostra.

Coimbra, 19 de Junho de 2010

O Operador

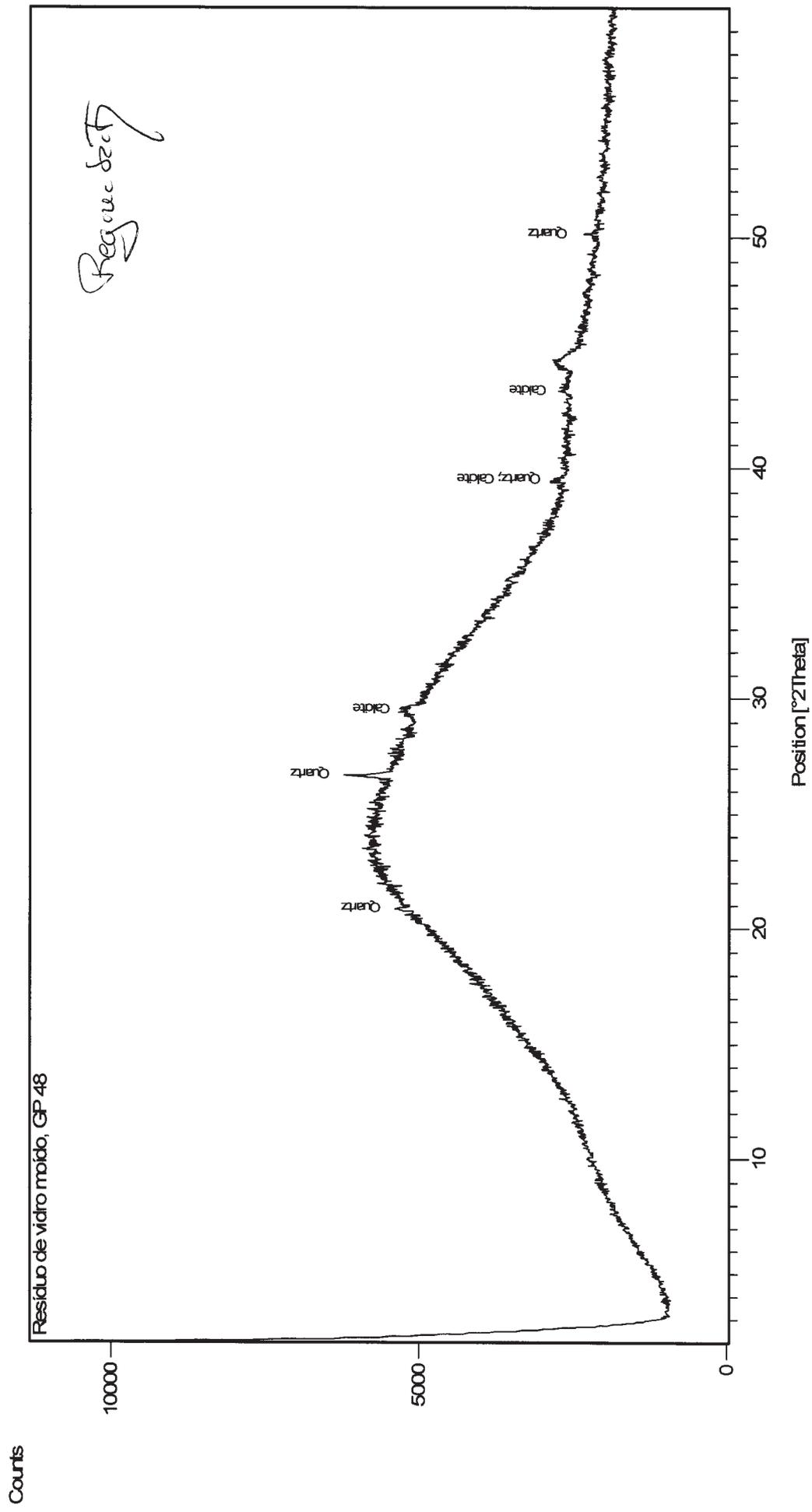
Erica Matos

Erica Matos

O Responsável do Laboratório

Alice Oliveira

Alice Oliveira



CTCV - Medição e Ensaio
Laboratório de Análise de MateriaisRELATÓRIO N°
Refª amostra311.1307/10
2010.21.3558/DV

Cliente	UNIVERSIDADE DO PORTO-FACULDADE DE ENGENHARIA	Processo nº	311.16056
Endereço	4050-123 PORTO	Data de entrada	19.05.10
Material	Diverso		
Refª cliente	Resíduo do vidro moído GP48	Data de execução	26.05 a 2.07.10

ANÁLISE QUÍMICA QUANTITATIVA

Norma / P.E.	Parâmetro Analítico	Valor obtido	Incerteza	Unidades	Método Analítico
EN 196-2	Perda ao Rubro	0,92	± 0,09	%	Gravimetria a 975 °C
"	SiO ₂	70	± 8	%	Gravimetria. Volatilização com HF
311.507	Al ₂ O ₃	1,2	± 0,1	%	Espectrofotometria de Absorção Atómica (Chama)
"	Fe ₂ O ₃	0,65	± 0,08	%	"
"	CaO	8,7	± 0,5		
"	MgO	3,7	± 0,4	%	"
"	Na ₂ O	16	± 2	%	"
"	K ₂ O	0,35	± 0,04	%	"
"	Ti ₂ O	< 0,3 ^{l.q.}	n.a.	%	"
"	Cr ₂ O ₃	< 0,1 ^{l.q.}	n.a.	%	"
EN 196-2	SO ₃	< 0,05 ^{l.q.}	n.a.	%	Gravimetria. Precipitação com BaCl ₂
"	Cl	< 0,005 ^{l.q.}	n.a.	%	Potenciometria. Eléctrodo Iónico selectivo

Legenda:

PE CTCV: Procedimento de Ensaio CTCV

As incertezas expandidas das medições efectuadas estão expressas pelas incertezas padrão das medições, multiplicadas pelo factor de expansão, que para um distribuição t-Student, corresponde a uma probabilidade de 95%.

As incertezas padrão das medições foram calculadas de acordo com EURACHEM/CITAC Guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement.

l.q.: limite de quantificação

n.a.: não aplicável

Observações :

- Amostragem: - Da responsabilidade do cliente
- Preparação da amostra: - Moagem e peneiração a 200 mesh ASTM
- Secagem a 100-110 °C
- Solubilização de acordo com 13.2 da EN 196-2:2005

Coimbra, 13 de Julho de 2010

O Técnico qualificado

Eva Costa

O Responsável do Laboratório

Alice Oliveira

Sika ViscoCrete® 3000

Adjuvante para betão

Descrição do produto

Sika ViscoCrete 3000 é um adjuvante superplastificante/forte redutor de água para betão de acordo com a norma EN 934-2:T3.1/3.2.
Sika ViscoCrete 3000 é um superplastificante da terceira geração para betão.

Utilizações

Sika ViscoCrete 3000 é indicado para betão pronto industrial e também para betão fabricado no estaleiro, quando o betão necessita de transporte longo ou para betonagens demoradas. As propriedades do betão dependem do teor do ligante e dos agregados, da relação água/cimento no betão fresco e da dosagem do adjuvante.

Sika ViscoCrete 3000 é usado para os seguintes tipos de betão:

- Betão com transporte longo (mantendo a consistência) e betonagens demoradas.
- Máxima redução de água de amassadura.
- Altas resistências.
- Betão autocompactável (BAC).

Vantagens

Sika ViscoCrete 3000 confere uma óptima dispersão do ligante e ao mesmo tempo melhora a sua coesão, mantendo o betão com uma consistência branda. As propriedades do betão com Sika ViscoCrete 3000 podem ser resumidas como se segue:

- Extremamente alta redução da água de amassadura (resultando daí alta densidade e impermeabilidade do betão endurecido).
- Excelente fluidez (resultando daí muito menos dificuldades e esforço na betonagem, quer na colocação, quer na compactação).
- Adequado para a produção de betão autocompactável (BAC).
- Melhor comportamento à retracção e à fluência.
- O betão carbonata mais lentamente.

Sika ViscoCrete 3000 é isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.

Dados do produto

Aspecto Líquido levemente amarelado.

Fornecimento 210 kg (200 litros); 1.050 kg (1m³); granel.

Armazenagem Armazenar o produto nas embalagens de origem não encetadas e não deterioradas, ao abrigo da radiação directa do sol e da geada, a temperaturas entre +5°C e +35°C.

Conservação O produto conserva-se pelo menos 15 meses a partir da data de fabrico.

Dados técnicos

Tipo Carboxilatos modificados.



Massa volúmica (23° ± 2°C)	1,05 ± 0,02 kg/dm ³ .
pH (23°C ± 2°C)	5,0 ± 1,0.
Teor de sólidos	18,5 ± 1,5%.

Aplicação

Dosagem	<p>Dosagens recomendadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Betão de consistência plástica: 0,5-1,2% sobre o peso do cimento, o que em volume equivale aprox. a 0,5-1,1 litros para 100 kg de cimento. ■ Betão fluido e betão auto compactável (BAC): 1,0%-2,0% sobre o peso do cimento, o que em volume equivale aprox. a 1,0-1,9 litros para 100 kg de cimento.
----------------	---

Adição	Sika ViscoCrete 3000 é adicionado à água de amassadura ou em simultâneo, directamente na betoneira. Para uma utilização optimizada em composições com alta redução da água, recomenda-se um tempo mínimo de amassadura húmida de 60 segundos. A restante água de amassadura que é necessária para ajustar a consistência desejada do betão, só deve ser feita após ter passado 2/3 do tempo de amassadura húmida, a fim de evitar um excesso de água no betão.
---------------	--

Betonagem	Sika ViscoCrete 3000 permite o fabrico de betão da mais alta qualidade, pelo que as regras de boa prática para betonar devem ser seguidas, quer no que respeita à produção, quer na colocação. Devem tomar-se as medidas necessárias para a boa cura do betão fresco.
------------------	---

Combinações	<p>Sika ViscoCrete 3000 pode ser combinado com os seguintes produtos Sika:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Sika FerroGard-901. ■ Sika Pump. ■ Sika Rapid. ■ Sikacrete. <p>Recommended-se sempre ensaios prévios. Consultar os Serviços Técnicos Sika.</p>
--------------------	--

Importante	<p>Betão fluido, betão autocompactável (BAC):</p> <p>Sika ViscoCrete 3000 também é adequado para a produção de betão fluido e para betão autocompactável (BAC). Em ambos os casos a composição tem de ser estudada. Consultar os Serviços Técnicos Sika.</p>
-------------------	---

Risco e segurança

Medidas de segurança	Preparação não perigosa. Quando em contacto com a pele, lavar com água e sabão. No caso de contacto acidental com os olhos ou mucosas, lavar imediatamente com muita água morna e consultar um especialista. Não lançar os resíduos nas canalizações, cursos de água, ou terrenos. Para mais informações, requerer a ficha de segurança do produto.
-----------------------------	---

"O produto está seguro na Cª Seguros Metrópole, SA (Apólice nº 4036758), a título de responsabilidade civil do fabricante".

A informação e 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. 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. 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 as versões mais recentes das fichas técnicas dos respectivos produtos, que serão entregues sempre que pedidas.



Sika Portugal, SA
R. de Santarém, 113
4400-292 V. N. Gaia
Portugal

Tel. +351 22 377 69 00
Fax +351 22 370 20 12
www.sika.pt



Implementado na fábrica de Ovar



Sprayset SF

Humo de sílice para hormigón proyectado

Usos

Sprayset SF es adecuado para incrementar las resistencias mecánicas del hormigón proyectado, aportando una tixotropía que hace posible su aplicación en capas gruesas.

Ventajas

- Aumenta la cohesión del hormigón fresco.
- Sprayset SF aporta tixotropía a los hormigones proyectados tanto por vía seca como húmeda.
- Reduce la permeabilidad del hormigón proyectado aumentando la durabilidad del mismo.
- Proporciona una excelente resistencia a los ciclos hielo-deshielo.
- Aumenta la resistencia del hormigón a los ataques de diferentes agentes químicos.
- Permite la reducción de cemento en hormigón de iguales características.

Descripción

Sprayset SF es una adición a base de humo de sílice para añadir a las mezclas en seco de áridos y cemento para gunita y hormigón proyectado.

Dosificación óptima

La dosificación óptima de Sprayset SF para lograr requerimientos específicos, debe determinarse mediante ensayos, empleando los materiales y condiciones con que se trabajará en la práctica.

Un punto de partida para tales ensayos es emplear una dosificación de 4 a 6 Kg de Sprayset SF por 100 Kg de cemento.

Propiedades

Apariencia:	Polvo gris muy fino
--------------------	---------------------

Contenido en cloruros:	Exento
-------------------------------	--------

Modo de empleo

Compatibilidad

Sprayset SF es compatible con otros aditivos de Fosroc Euco y con todo tipo de cemento Portland ordinario.

Mezcla

Sprayset SF se añade a la mezcla seca de cemento-áridos de forma que quede uniformemente distribuido dentro de la misma. Nunca se añadirá a la mezcla húmeda. En algunos casos, es necesario aumentar el tiempo de mezcla.

Curado

Se debe proteger el hormigón fresco contra una desecación a corta edad con un agente de curado, Concure.

Limpieza y eliminación

Los derrames de Sprayset SF deben absorberse con arena o tierra y ser transferidos a unos contenedores apropiados. Los restos de producto deben ser chorreados con gran cantidad de agua. La eliminación del producto y del envasado es responsabilidad del usuario final.

Envasado

Sprayset SF:	Saco 20 kg
---------------------	------------

Almacenamiento

Sprayset SF tiene un período de almacenamiento de 12 meses, siempre que se mantenga a una temperatura entre 2 y 40°C.

Precauciones

Seguridad e higiene

Sprayset SF no debe ser ingerido o puesto en contacto con piel y ojos. Llevar puestos guantes protectores, gafas y mascarilla. En caso de contacto con los ojos eliminar inmediatamente con mucho agua y acudir al médico. Si se ingiere, buscar atención médica inmediata. No inducir al vómito.

Para más información, consultar la hoja de seguridad de este producto.

Fuego

Sprayset SF no es inflamable.

Sprayset SF

Marzo 2004



Fosroc Euco, s.a.

Gasteiz Bidea, 11
48213 Izurtza (Bizkaia)

www.fosroc.com

Nota importante

Los productos de Fosroc Euco están garantizados frente a defectos de fabricación y se facturan de acuerdo a las condiciones standard de venta de Fosroc Euco. La información, recomendaciones y especificaciones reflejadas en este documento se consideran las correctas y están basadas en datos obtenidos mediante nuestra propia investigación. No obstante, debido a que Fosroc Euco no tiene un control directo o continuo sobre cómo y dónde se aplican sus productos, no puede aceptar responsabilidades directas o indirectas derivadas del uso de sus productos, si no hay seguridad de haber cumplido las recomendaciones y especificaciones facilitadas por Fosroc Euco. Este documento no es contractual y puede ser modificado sin previo aviso.

teléfono:
94 621 71 60

fax:
94 681 51 50

e-mail:
spain@fosroc.com