

RESÍDUO INDUSTRIAL DE VIDRO PARA BETÃO

JOÃO VASCO MONTEIRO NEVES

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

JUNHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

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 - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo 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 eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Durante a fase mais exigente do meu percurso académico contei sempre com o apoio de diferentes pessoas às quais não podia deixar de mostrar a minha gratidão.

À minha orientadora, Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de Sousa Coutinho, por todo o apoio, incentivo e disponibilidade demonstrada durante este período.

A todos no LEMC, pelo apoio constante e disponibilidade absoluta.

Ao LABEST, em especial à Eng.^a Paula, pela compreensão e ajuda em diversos ensaios realizados.

Um agradecimento à BA Glass, em especial ao Eng.^o Reinaldo Coelho, ao Eng.^o Manuel Loureiro e ao Eng.^o José Beira, o fornecimento da amostra e diversas informações que permitiram completar o presente trabalho.

A todos aqueles que me acompanharam durante o meu percurso académico, com bons e maus momentos, não podia deixar de agradecer e reconhecer o seu valor.

Aos meus amigos que, de uma maneira ou outra, estiveram sempre presentes, motivando, incentivando e exigindo o melhor de mim.

Ao Sérgio, por devolver a mística e a coragem necessária, servindo de inspiração para esta luta diária.

Um agradecimento especial à Ana, pela paciência, pelo carinho, pela preocupação e, sobretudo, dedicação diária.

Aos meus pais e à minha irmã, pelo apoio incondicional, por todos os esforços realizados por mim e por fazerem parte desta caminhada.

RESUMO

A possibilidade de utilizar resíduos de vidro, reaproveitando e redirecionando o material para uma indústria diferente e como substituto parcial do cimento, permite melhorar as características de durabilidade do betão e reduzir o consumo de matérias-primas, no sentido de Economia Circular.

O objetivo do trabalho consistiu em estudar a utilização de resíduos de vidro moído (GGPBA) e não moído (GPBA), provenientes de uma empresa que produz embalagens de vidro. Os resíduos foram utilizados em argamassa e seguiram um programa experimental pré-definido com o intuito de estudar a resistência e durabilidade, projetando a sua utilização em betão estrutural.

As três espécies de argamassas, com dosagens de substituição do cimento por 0% (CTL), 10% GPBA e 10% GGPBA, foram testadas aos 7, 28, 56 e 84 dias de forma a determinar as resistências mecânicas e as propriedades relacionadas com a durabilidade, tais como a carbonatação, absorção de água por capilaridade, penetração de cloretos, resistividade elétrica, expansão devido à reação álcalis-sílica (ASR) e resistência ao ataque por sulfatos.

A resistência mecânica observada demonstrou ser muito inferior aos requisitos mínimos. Relativamente à durabilidade, excluindo a questão da carbonatação e os resultados semelhantes obtidos para a resistência à penetração de cloretos, o material não moído GPBA apresenta um melhor desempenho relativamente à absorção por capilaridade e resistividade elétrica, enquanto que o material moído GGPBA apresenta um melhor desempenho relativamente à ASR.

Perante a confirmação da presença de fibras após a observação do material no MEV e juntamente com os valores muito baixos da resistência mecânica para ambas as argamassas com 10% de substituição de cimento, surgiu a possibilidade de incinerar o material de forma a eliminar as fibras e realizar ensaios de resistência mecânica cujos valores se aproximaram do desejado.

A utilização do resíduo de vidro com fibras, antes e após a moagem, não é aconselhável. No entanto, a utilização do material após a incineração apresenta bons resultados relativamente à resistência mecânica, mas considera-se que terá de ser sujeito a um procedimento experimental adequado.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade, pó de vidro, argamassas, fibras, durabilidade.

ABSTRACT

The possibility of using waste glass, reusing and redirecting it to a different industry as partial cement replacement has allowed to improve durability related proprieties and reduce consumption of raw materials, towards Circular Economy.

The purpose of this thesis is to study the use of ground (GGPBA) and non-ground (GPBA) waste glass generated in a company that produces glass containers. The waste was used to incorporate mortars and followed a predefined experimental programme aiming to study strength and durability and thus potential application in structural concrete.

The three types of mortars, with replacement dosages of 0% (CTL), 10% GPBA e 10% GGPBA, were tested at days 7, 28, 6 and 84 to determine strength and durability related properties such as carbonation, water absorption by capillarity, chloride penetration, electrical resistivity, alkali-silica reaction (ASR) and sulphate resistance.

Mechanical strength proved to be well under requirements. In terms of durability, except for carbonation and the similar results that occurred from chloride penetration, the non-ground GPBA material presents a better performance regarding water absorption by capillarity and electrical resistivity, while the ground GGPBA material presents a better performance regarding ASR.

The presence of fibres by SEM observation of different samples and the low strength results for both mortars (10% GPBA and 10%GGPBA), resulted in the possibility of incinerating the material in order to eliminate fibres and perform strength tests whose results came close to those originally desired.

Using waste glass with fibres, before and after grinding, is not a suitable solution. However, the incineration of this material has provided hopeful results in terms of strength. Further testing involving an appropriate experimental programme with regards to durability properties must be carried out in the future.

KEYWORDS: sustainability, glass powder, mortars, fibres, durability.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. FABRICO DE CIMENTO PORTLAND	3
1.3. RESÍDUOS NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA	4
1.4. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO.....	5
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	6
2 ESTADO DA ARTE	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. RESÍDUO DE VIDRO.....	7
2.2.1. PRODUÇÃO DE VIDRO.....	7
2.2.2. RECICLAGEM DO VIDRO	8
2.3. PÓ DE VIDRO COMO MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO	9
2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	9
2.3.2. ASR	10
2.3.3. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	17
2.3.4. PENETRAÇÃO DE CLORETOS	22
2.3.5. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	27
2.3.6. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	28
2.3.7. CARBONATAÇÃO	28
2.3.8. RESISTÊNCIA AO ATAQUE DOS SULFATOS	31
2.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1. INTRODUÇÃO	35
3.2. MATERIAIS.....	36
3.2.1. ÁGUA DESTILADA.....	36
3.2.2. AREIA NORMALIZADA CEN	36
3.2.3. CIMENTO	36
3.2.4. PÓ DE VIDRO	37
3.3. MOAGEM	40

3.4. ENSAIOS.....	44
3.4.1. MASSA VOLÚMICA.....	44
3.4.2. SUPERFÍCIE ESPECÍFICA	45
3.4.3. ENSAIOS COM ARGAMASSAS.....	47
3.4.3.1. Fabrico e composição dos provetes.....	47
3.4.3.2. Avaliação da trabalhabilidade	48
3.4.3.3. Massa Volúmica	49
3.4.3.4. Resistências Mecânicas.....	50
3.4.3.5. Resistividade Elétrica	54
3.4.3.6. Carbonatação acelerada	56
3.4.3.7. Absorção por Capilaridade.....	58
3.4.3.8. Resistência à penetração de cloretos	61
3.4.3.9. Resistência ao ataque por sulfatos	65
3.4.3.10. Reação álcalis-sílica (ASR).....	68
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
4 QUEIMA DE GPBA	73
4.1. ENQUADRAMENTO.....	73
4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	74
5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES	77
5.1. DISCUSSÃO DE RESULTADOS (GPBA E GGPBA)	77
5.1.1. ANÁLISES QUÍMICAS	78
5.1.2. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	79
5.1.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	80
5.1.4. CARBONATAÇÃO ACELERADA	81
5.1.5. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	82
5.1.6. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS	82
5.1.7. ASR	83
5.2. CONCLUSÕES (GPBA E GGPBA)	83
5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS APÓS QUEIMA	84
5.4. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	86
5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXOS	89
Anexo A: FICHA TÉCNICA DO CIMENTO CEM I 42,5R.....	91
Anexo B: ANÁLISE QUÍMICA DO GPBA.....	92
Anexo C: LEITURAS ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	95

Anexo D: RESISTIVIDADE ELÉTRICA 84 DIAS	96
Anexo E: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS	97
Anexo F: VALORES MÉDIOS DA DEFORMAÇÃO DEVIDO AO ATAQUE POR SULFATOS	98
Anexo G: EXPANSÕES DEVIDO A ASR	99
Anexo H: RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama da construção sustentável (TEODORO, 2011).....	2
Figura 1.2: Emissões globais de CO ₂ no ano 2000 e respetiva contribuição do cimento (REHAN e NEHDI, 2005)	3
Figura 1.3: Investimentos de sustentabilidade por atividade (Relatório de Sustentabilidade 2011, CIMPOR)	4
Figura 2.1: <i>Meta a atingir para a produção de reciclagem (APA, 2017)</i>	8
Figura 2.2: Ciclo de vida do vidro (https://letsreciclar.wordpress.com).....	9
Figura 2.3: Curvas de Expansão em barras de argamassas contendo partículas de vidro com diferentes granulometrias (SHAYAN e XU, 2004)	13
Figura 2.4: Expansões finais das argamassas aos 14 dias (MATOS e SOUSA-COUTINHO,2012) ...	14
Figura 2.5: Modelo no consumo de álcalis na reação pozolânica (TAHA e NOUNU, 2008).....	15
Figura 2.6: Granulometria de partículas finas de vidro de frações diferentes usadas em argamassas (KHMIRI,CHAABOUNI e SAMET,2013)	15
Figura 2.7: Difração por raios-X da amostra de WG (KHMIRI, CHAABOUNI e SAMET, 2013).....	16
Figura 2.8: Resistência à compressão e flexão (MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012).....	18
Figura 2.9: Resistência à compressão em cilindros para várias idades (SHAYAN e XU, 2006)	18
Figura 2.10: Resistência à compressão CTL SCC (MATOS <i>et al.</i> ,2016)	19
Figura 2.11: Resistência à compressão BGP SCC (MATOS <i>et al.</i> ,2016)	20
Figura 2.12: Corrosão da armadura por “picadas” pelos cloretos (COUTINHO, 1988).....	23
Figura 2.13: Resultados do ensaio RCP (SHAYAN e XU, 2006)	24
Figura 2.14: Resistência à penetração de cloretos (OMRAN <i>et al.</i> ,2017).....	26
Figura 2.15: Coeficiente de absorção para cada argamassa (MATOS e SOUSA-COUTINHO,2012). 27	
Figura 2.16: Profundidade de carbonatação depois de 2 e 4 meses na câmara de carbonatação	29
Figura 2.17: Profundidade de carbonatação (MATOS <i>et al.</i> ,2016).....	30
Figura 2.18: Expansão devido ao ataque por sulfatos ao longo de 26 semanas (MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012)	31
Figura 3.1: Resíduo de vidro GPBA	38
Figura 3.2: Plástico e fibras retidas no peneiro 1mm	39
Figura 3.3: Moinho planetário PM 100	40
Figura 3.4: Peneiro com esferas de 1mm e com fibras	41
Figura 3.5: Fibras visíveis na moagem seca.....	41
Figura 3.6: GPBA com álcool e esferas de 1mm	42
Figura 3.7: Amostra de GPBA (a)) e GPBAmoído a seco (b)) observadas ao microscópio.....	43
Figura 3.8: Amostra de GGPBA observada ao microscópio.....	43

Figura 3.9: Voluminímetro com petróleo e material a estudar	44
Figura 3.10: Equipamento utilizado no ensaio de Blaine	46
Figura 3.11: Procedimento de fabrico da argamassa (NP EN 196-1,2006)	47
Figura 3.12: Medição dos diâmetros de espalhamento	49
Figura 3.13: Ensaio de resistência à flexão	51
Figura 3.14: Semi-prisma resultante do ensaio	52
Figura 3.15: Ensaio de resistência à compressão	53
Figura 3.16: Provetes com redes de inox	54
Figura 3.17: Ensaio de resistividade elétrica	55
Figura 3.18: Evolução da resistividade elétrica.....	56
Figura 3.19: Provetes utilizados no ensaio de carbonatação acelerada	57
Figura 3.20: Provetes pulverizados por fenolftaleína	57
Figura 3.21: Profundidade de carbonatação	58
Figura 3.22: Provetes cilíndricos	59
Figura 3.23: Equipamento utilizado para realizar o ensaio	59
Figura 3.24: Curvas de absorção capilar	60
Figura 3.25: Provetes na câmara de vácuo	62
Figura 3.26: Provetes sujeitos a um potencial elétrico.....	62
Figura 3.27: Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos	63
Figura 3.28: Medição da profundidade de penetração de cloretos.....	64
Figura 3.29: Solução de sulfato de sódio	66
Figura 3.30: Medição da expansão do provete.....	67
Figura 3.31: Evolução da expansão ao longo de 10 semanas	68
Figura 3.32: Provetes utilizados para avaliar a reação ASR	69
Figura 3.33: Pernos colocados nas extremidades dos provetes	70
Figura 3.34: Leitura dos comprimentos dos provetes	70
Figura 3.35: Resultados da expansão ASR ao final de 28 dias.....	71
Figura 4.1: Amostra de GGPBA observada ao microscópio.....	73
Figura 4.2: Resistência à compressão das diferentes argamassas (MPa)	74
Figura 4.3: Resultado da incineração do material GPBA a uma temperatura de 400°C	75
Figura 4.4: Homogeneização do material t_{700} GPBA	75
Figura 5.1: I.A. aos 28 dias	79
Figura 5.2: Resistividade elétrica (NUNES <i>et al.</i> ,2013)	80

Figura 5.3: Resistividade elétrica das diferentes pastas cimentícias (KAMALI e GHahremaninezhad,2016).....	81
Figura 5.4: Profundidade de carbonatação (RAMOS <i>et al.</i> ,2014, ROCHA,2016).....	81
Figura 5.5: Análise geral de resultados dos fatores de durabilidade	84
Figura 5.6: Massa volúmica dos diferentes provetes.....	84
Figura 5.7: Resistência à compressão.....	85
Figura 5.8: I.A. obtido com os diferentes materiais.....	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Produção de Resíduos por Setor (INE, 2014)	1
Tabela 2.1: Métodos de ensaio para avaliação da reatividade aos álcalis de agregados para betão (SILVA, FERNANDES e CASTRO, 2008).....	12
Tabela 2.2: Composição química do cimento e de WGP (MATOS e SOUSA-COUTINHO,2012).....	13
Tabela 2.3: Composição química dos materiais (TAHA e NOUNU, 2008).....	14
Tabela 2.4: Composição química dos materiais utilizados (KHMIRI, CHAABOUNI e SAMET, 2013) .	16
Tabela 2.5: Composição química do cimento e do resíduo de pó de vidro (MATOS <i>et al.</i> ,2016).....	19
Tabela 2.6: Composição química do cimento e do pó de vidro (ALIABDO, ABD ELMOATY e ABOSHAMA, 2016)	20
Tabela 2.7: Composição dos diferentes betões produzidos (ALIABDO, ABD ELMOATY e ABOSHAMA, 2016)	21
Tabela 2.8: Resistência à compressão (ALIABDO, ABD ELMOATY e ABOSHAMA, 2016).....	22
Tabela 2.9: a) Resistência à penetração de cloretos baseado nos resultados do ensaio NT Build 492 b) Penetração de cloretos de acordo com a carga passada através dos provetes-RCP	24
Tabela 2.10: Propriedades físicas e químicas do cimento, pó de vidro, sílica de fumo e cinzas volantes (OMRAN <i>et al.</i> ,2017)	25
Tabela 2.11: Composição dos diferentes elementos estruturais estudados (OMRAN <i>et al.</i> ,2017)	25
Tabela 2.12: Resultados da resistividade elétrica (MATOS <i>et al.</i> ,2016)	28
Tabela 2.13: Composições e resultados dos provetes de betão (NUNES <i>et al.</i> ,2013)	30
Tabela 3.1: Composição granulometria Areia normalizada CEN	36
Tabela 3.2: Análise química e ensaios mecânicos do cimento fornecido pela SECIL	36
Tabela 3.3: Composição química GPBA.....	39
Tabela 3.4: Granulometria do cimento e GPBA (μm)	40
Tabela 3.5: Granulometria do cimento e do GPBA moído a seco (μm).....	41
Tabela 3.6: Granulometria do resíduo de vidro após as diferentes moagens (μm).....	42
Tabela 3.7: Massa volúmica dos materiais a utilizar.....	45
Tabela 3.8: Superfície específica dos diferentes materiais	47
Tabela 3.9: Composição das argamassas.....	47
Tabela 3.10: Provetes a utilizar e respetiva compactação	48
Tabela 3.11: Intervalo de trabalhabilidade	49
Tabela 3.12: Pesagens obtidas antes da realização do ensaio de resistência mecânica (g)	50
Tabela 3.13: Massas volúmicas (g/cm^3)	50
Tabela 3.14: Requisitos mecânicos e físicos expressos como valores característicos (NP EN 197-1,2012)	51

Tabela 3.15: Resultados da resistência à flexão para as diferentes idades (MPa).....	52
Tabela 3.16: Resultados da resistência à compressão para as diferentes idades (MPa).....	54
Tabela 3.17: Resultados da resistividade elétrica para as diferentes idades (kΩ.cm).....	55
Tabela 3.18: Resultados da profundidade de carbonatação (mm).....	58
Tabela 3.19: Coeficiente de absorção dos diferentes materiais.....	60
Tabela 3.20: Limites do coeficiente de absorção no betão.....	61
Tabela 3.21: Classificação de resistência do betão.....	61
Tabela 3.22: Diferença de potencial elétrico e duração do ensaio de migração (E463,2004).....	63
Tabela 3.23: Profundidade de penetração de cloretos.....	64
Tabela 3.24: Coeficiente de difusão dos cloretos.....	65
Tabela 3.25: Expansão provocada pelo ataque por sulfatos (10 semanas).....	68
Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de resistência mecânica (MPa).....	76
Tabela 4.2: Massa volúmica dos provetes de t ₇₀₀ GPBA (g/cm ³).....	76
Tabela 5.1: Fatores de durabilidade.....	77
Tabela 5.2: Resistência mecânica, Desempenho e I.A.	78
Tabela 5.3: Propriedades químicas.....	79
Tabela 5.4: Coeficiente de absorção (MATOS e SOUSA-COUTINHO,2012).....	82
Tabela 5.5: Coeficiente de absorção (MATOS <i>et al.</i> ,2016).....	82
Tabela 5.6: Coeficiente de difusão (SILVA. 2016).....	83

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

σ - Desvio padrão

μm - Micrómetro

Al_2O_3 - Óxido de alumínio

ASR- Reação álcalis-sílica

ASTM- American Society for Testing and Materials

Au- Ouro

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

CaCO_3 - Carbonato de cálcio

CaO - Óxido de cálcio

CEM I 42,5R- Cimento Portland da classe I 42,5R

Cl- Cloreto

COVs- Composto orgânico volátil

CO_2 - Dióxido de carbono

CPIV- Comité de Permanent des Industries du Verre

CTL- Argamassa de controlo (0% de substituição)

Dns,médio- Coeficiente de difusão aparente (m^2/s)

DSC- Calorimetria diferencial de varrimento

GJ- Giga Joule

GGPBA- Pó de vidro moído da empresa BA GLASS

GP- resíduo de vidro moído

GPBA- Pó de vidro da empresa BA GLASS

K_2O - Óxido de potássio

LABEST- Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

LEMC- Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção

MgO - Óxido de magnésio

MnO - Óxido de manganês

MPa- Mega Pascal

Na_2O - Óxido de sódio

$^{\circ}\text{C}$ - Graus centígrados

Pd- Paládio

S- Coeficiente de absorção ($\text{mg}/\text{mm}^2.\text{min}^{0.5}$)

SCC- Betão autocompactável

SEM- Microscopia eletrónica de varrimento

SF- Sílica de fumo

SiO₂- Óxido silício

XRD- Difração por raios x

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Um dos sectores económicos mais importantes na Europa é a indústria da construção, representando cerca de 7,5% do emprego em toda a economia europeia. É imprescindível que se continue a gerar preocupação com o consumo excessivo de matérias-primas, recursos energéticos ou a produção excessiva de resíduos, contribuindo para isto os métodos de construção tradicionais e a mão-de-obra não qualificada.

O setor da construção é responsável por 30% das emissões de carbono e, a este ritmo, será incompatível, no que toca a consumos de materiais e energias, cumprir com o desenvolvimento sustentável, definido pela ONU como aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades.

Em Portugal, segundo os dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Estatística, a indústria da Construção posiciona-se, entre 2010 a 2014, como um dos sectores com maior produção de resíduos.

Tabela 1.1: Produção de Resíduos por Setor (INE, 2014)

Tipologia de resíduos	Unidade: 10 ³ t							
	Agricultura, Floresta e Pescas	Indústrias Extrativas	Indústrias Transformadoras	Energia	Abast. de Água e Saneamento	Gestão e valorização de resíduos	Construção	Comércio e Serviços
Total de resíduos:	399	2 713	15 903	1 531	3 189	18 245	7 778	6 860
Não Perigosos	393	2 705	14 880	1 468	3 044	17 231	7 659	6 275
Perigosos	7	8	1 024	63	145	1 014	119	586
dos quais:								
Óleos usados	2	3	49	7	0	96	10	75
Resíduos químicos	1	2	370	12	10	125	12	171
Efluentes industriais	0	0	108	9	69	99	8	53
Lamas e resíduos do tratamento de resíduos	0	0	19	9	0	89	0	12
Resíduos da prestação de cuidados de saúde	0	0	15	0	0	14	0	108
Resíduos de madeira	0	0	148	0	0	0	0	2
Veículos em fim de vida	1	1	6	0	0	67	23	79
Baterias e acumuladores	1	0	10	0	0	179	1	35
Resíduos de combustão	0	0	209	1	7	0	0	0
Resíduos minerais do tratamento de resíduos e resíduos estabilizados	0	0	1	0	0	211	0	2

No entanto, fruto da crise económica que se fez sentir, sobretudo no setor da construção, durante os últimos anos, a diminuição da atividade económica provocou uma diminuição na produção de resíduos.

É neste sentido e com o objetivo de implementar este tipo de filosofia na indústria que o CIB, Conselho Internacional da Construção, define como os pilares fundamentais para a construção sustentável os seguintes:

- Redução do consumo de recursos;
- Reutilização de recursos;
- Utilização de recursos recicláveis;
- Proteção da natureza;
- Eliminação de tóxicos;
- Aplicação de análises de ciclo de vida em termos económicos;
- Ênfase na qualidade.

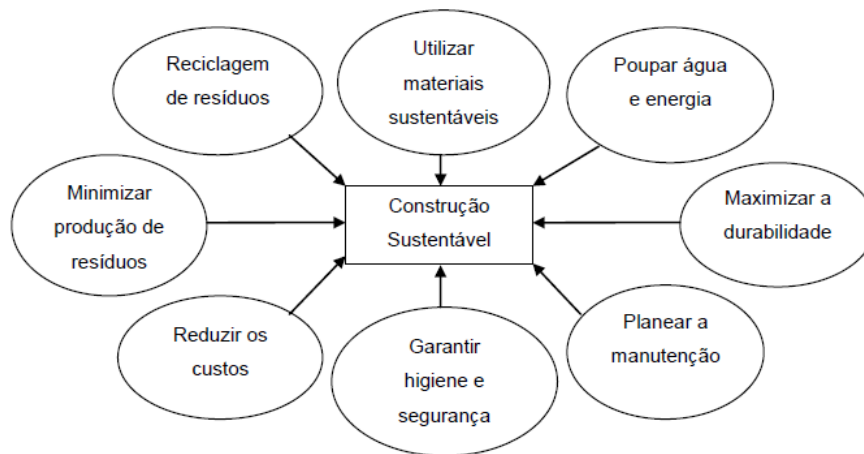


Figura 1.1: Diagrama da construção sustentável (TEODORO, 2011)

De acordo com Bragança *et al.*, o objetivo da construção sustentável passa pelo equilíbrio dinâmico entre fatores ambientais (qualidade de vida e qualidade do ambiente construído), fatores sociais (equidade social e herança social) e fatores económicos (desenvolvimento economicamente sustentável). É de acordo com esta mentalidade que o desenvolvimento das atividades construtivas se começou a focar não só na qualidade do produto final e nos seus custos para também se concentrar nas preocupações ambientais, saúde e biodiversidade.

Presentemente, a preocupação dos intervenientes centra-se em transformar a economia, tradicionalmente linear, em Economia Circular tendo já sido dados uma série de passos nesse sentido, como por exemplo a utilização de aço como armaduras de betão armado, produzido em Portugal e proveniente da sucata, ou o esforço que tem sido feito, também através da legislação, do uso de RCD- Resíduos de Construção e Demolição.

1.2. FABRICO DE CIMENTO PORTLAND

O processo de fabrico do cimento é feito através da extração dos materiais provenientes da pedra, posteriormente submetidos a um britador, que torna o material mais pequeno e fácil de transportar. A etapa seguinte, designada por moagem de cru, passa por moer a pedra até se obter um pó fino (cru). Este mesmo pó passa pela etapa de cozedura, onde está sujeito a temperaturas de 1450 ° C. Daqui surge uma rocha artificial, chamada clínquer, que misturada com aditivos como gesso, é moída formando cimento (SECIL, 2006)

Este processo exige cerca de 3,2 a 6,3 GJ de energia e 1,7 toneladas de matérias-primas por tonelada de clínquer, acompanhado por emissões atmosféricas, na sua maioria de dióxido de carbono (Relatório de Sustentabilidade 2011, CIMPOR), resultante sobretudo da descarbonatação do calcário.

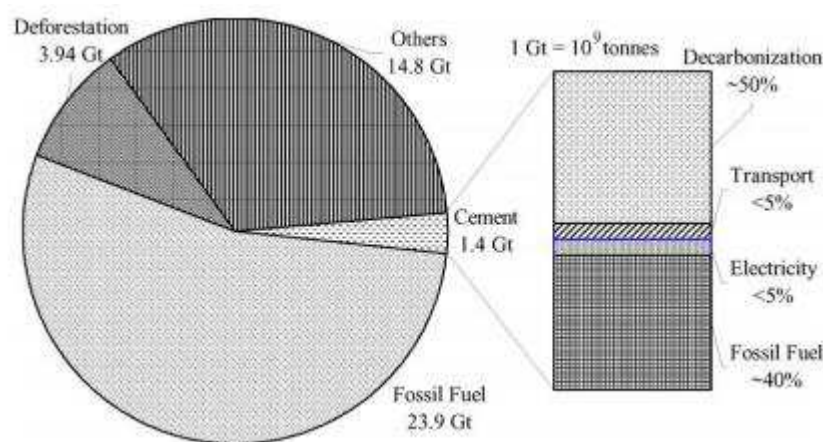


Figura 1.2: Emissões globais de CO₂ no ano 2000 e respetiva contribuição do cimento (REHAN e NEHDI, 2005)

Apesar do cimento apenas constituir, em massa, 10 a 15% do betão, é o constituinte com maior carga ambiental (COUTINHO, 1998). Ao seu elevado consumo de energia, alia-se a elevada percentagem de emissão de CO₂ e outros gases como NO_x, SO₂ e COVs, que contribuem para o efeito de estufa.

A redução das emissões destes gases pode ser feita recorrendo a sistemas de retenção das partículas como electrofiltros, filtros de mangas ou queimadores de baixo NO_x (Relatório de Sustentabilidade 2011, CIMPOR).

A redução de emissões a curto prazo passa pela redução da quantidade de clínquer através da produção de cimentos compostos, aumentar a percentagem de energia proveniente de combustíveis alternativos, aumentar a eficiência energética térmico e elétrica do processo de produção do clínquer e cimento. A médio prazo, a aposta na modernização das linhas de produção com a recuperação residual dos gases quentes do processo e o aumento da percentagem de utilização de matérias-primas alternativas são as diretivas a seguir, sendo que a longo prazo a aposta na investigação e desenvolvimento de novos produtos é a estratégia definida para um desenvolvimento sustentável (Relatório de Sustentabilidade 2011, CIMPOR).

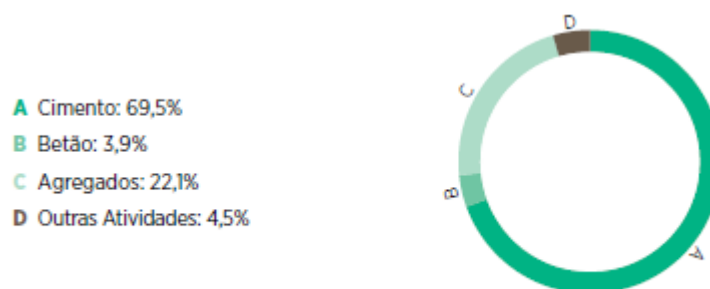


Figura 1.3: Investimentos de sustentabilidade por atividade (Relatório de Sustentabilidade 2011, CIMPOR)

O aumento da emissão de gases de efeito de estufa (GEE) associado ao aquecimento do planeta e às alterações climáticas, conjuntamente com a produção de cimento, onde se inclui matérias-primas e recursos energéticos, representa uma nova oportunidade para a inclusão de subprodutos de outras indústrias - a prática de Ecologia Industrial, no sentido de Economia Circular.

A consciencialização, pública e política, do problema ambiental da emissão de CO₂ tem crescido (RAMOS *et al.* 2014). O Acordo de Paris, assinado em 2015 por 195 países, é o primeiro grande compromisso de toda a comunidade internacional na luta contra as alterações climáticas. A constatação de que as alterações climáticas afetam toda a população mundial permitiu definir como grandes objetivos manter o aumento da temperatura média mundial abaixo dos 2 ° C em relação aos níveis pré-industriais e promover esforços para limitar o aumento a 1,5 ° C com a criação de planos nacionais abrangentes no domínio das alterações climáticas para a redução das emissões.

1.3. RESÍDUOS NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

A produção inicial de cimento apenas se focava na produção de cimento Portland, sendo que a produção deste com substituição de partes do clínquer por materiais cimentícios suplementares apenas se verificou mais tarde (MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012).

É já uma certeza a evolução conceptual do cimento, passando de um material à base de recursos não renováveis para um material que acrescenta um benefício para os resíduos de materiais de baixo valor imediato que geralmente são de interesse ambiental (MATOS, 2010). O cimento deixará de contar apenas com clínquer Portland e será concebido para minimizar o desperdício e as emissões de gases com efeito de estufa.

Apesar da existência de grandes quantidades de resíduos industriais, como sílica de fumo, cinzas volantes ou escória, e de resíduos agrícolas, como cinzas de casca de arroz, que durante muitos anos foram usados como matérias-primas e componentes na indústria cimenteira, existem ainda muitos outros resíduos que ainda não são usados (RAMOS *et al.*, 2014). Materiais como a sílica de fumo, cinzas volantes e escórias de alto-forno, já consideradas na regulamentação, são os mais utilizados. Destaque especial para a sílica de fumo que tem revelado resultados interessantes e benéficos nas estruturas de betão ou para a utilização de cinzas volantes com metacaulino para corrigir alguns inconvenientes associados à substituição de elevados volumes de cimento.

Os materiais que substituem parcialmente o cimento podem ser incorporados com clínquer Portland nas cimenteiras ou serem adicionados na betoneira (adições), permitindo economizar matérias-primas e melhorar a durabilidade das estruturas de betão, tendo em conta o tão desejável conceito de sustentabilidade na construção.

A sua utilização é benéfica não só em termos ambientais, mas também em relação à durabilidade do betão, com melhorias significativas no que à trabalhabilidade diz respeito. A resistência aos cloretos e a certas agressões de natureza química fruto do maior consumo de hidróxido de cálcio e, consequentemente, o menor risco de formação de etringite e diminuição do desenvolvimento da reação álcalis-sílica são motivos suficientes para levar a indústria a seguir este caminho.

A corrosão das armaduras, o principal problema em estruturas de betão armado ou pré-esforçado, é mais um motivo para que a indústria cimenteira invista neste tipo de resíduos (MEHTA, 1994). Estudos de alguns resíduos que ainda não se encontram normalizados e que são estudados ao longo desta dissertação apresentam resultados positivos no que à reação ASR e à resistência à penetração de cloretos diz respeito, como Matos e Sousa-Coutinho, Taha e Nounu ou Nunes *et al.* expuseram.

Ao menor gasto de energia que advém da utilização deste tipo de resíduos, de uma forma geral e em termos técnicos, existe uma melhoria das propriedades do betão fresco e endurecido. A melhoria da trabalhabilidade, significativa redução da permeabilidade, redução da segregação ou redução da exsudação são algumas das possíveis melhorias associadas à utilização destes resíduos de origens diferentes.

A atual produção mundial de betão atinge cerca de 1m³ por pessoa por ano. A utilização de forma eficiente destes resíduos como substituto parcial do cimento Portland tornará a indústria de construção mais “verde” e de acordo com os desígnios de um desenvolvimento sustentável e Economia Circular.

1.4. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO

O trabalho foi dividido em 5 capítulos e visa estudar a influência na resistência e durabilidade do uso de pó de vidro provenientes de uma central de processamento de casco de vidro inserido na empresa BA Glass, para substituição parcial do cimento em argamassa com vista à utilização em betão estrutural. O programa experimental definido pretende estudar o comportamento deste resíduo antes e após a moagem.

O capítulo 1 (Introdução) reúne um breve enquadramento do tema do trabalho e considerações gerais sobre a importância do investimento e desenvolvimento de novas soluções por parte da indústria cimenteira para minimizar o impacto ambiental do consumo de cimento Portland e apresenta o objetivo e organização do trabalho presente.

O capítulo 2 (Estado da Arte) resume-se a uma exposição sobre o conhecimento adquirido anteriormente que permitiu o desenvolvimento do trabalho relativo ao pó de vidro (GPBA e GGPBA).

No capítulo 3 (Programa Experimental) é feita a caracterização dos materiais utilizados e todas as metodologias dos ensaios realizados são discriminados. Destaque ainda para o facto de os resultados serem apresentados neste capítulo.

O capítulo 4 (Queima de GPBA) descreve uma solução alternativa para a utilização do material como substituo parcial do cimento, discriminando o procedimento experimental, expondo os resultados.

O capítulo 5 (Discussão de Resultados) analisa os resultados obtidos face aos parâmetros de durabilidade e de resistência mecânica, efetuando comparações com trabalhos desenvolvidos anteriormente, validando os mesmos. O capítulo contém ainda sugestões para futuros desenvolvimentos dentro do tema abordado.

1.5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA - Relatório do Estado do Ambiente Portugal 2016. Agência Portuguesa do Ambiente. [Em linha].Disponível em WWW: <https://rea.apambiente.pt/>

BRAGANÇA,Luís;MATEUS,Ricardo,GOUVEIA,Margarida-Construção sustentável:Novo paradigma do setor da construção.Seminário Paredes divisórias:Passado, presente e futuro.Porto [Em linha] [Consulta.Disponívelem:WWW:<URL:http://www.hms.civil.uminho.pt/events/paredes2011/67_82.pdf>f>

CIMPOR - Relatório de sustentabilidade 2011. Extraído do site www.cimpor.pt

INE-Estatísticas dos Resíduos 2014 [Em linha] Disponível em WWW: <URL:file:///C:/Users/Utilizador/Downloads/EResíduos_2014 (1).pdf>.

COUTINHO, Joana Sousa - Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem. FEUP Edições.1988. ISBN 9727520731.

MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana - Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. Construction and Building Materials.2012. ISSN 09500618. 36:2012) 205–215. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027.

Mheta PK - Mineral admixtures for concrete – an overview of recent developments. Advances in Cement an Concrete: Proceedings of an Engineering Foundation Conference. ASCE, Reston, VA, USA. Pp.243-256.

RAMOS, Telma; MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana - Strength and Durability of Mortar Using Cork Waste Ash as Cement Replacement. Materials Research. . ISSN 1516-1439. 17:4 (2014) 893–907. doi: 10.1590/S1516-14392014005000092.

REHAN, R.; NEHDI, M. - Carbon dioxide emissions and climate change: Policy implications for the cement industry. Environmental Science and Policy. ISSN 14629011. 8:2 (2005) 105–114. doi: 10.1016/j.envsci.2004.12.006.

SECIL- Produção de cimento. Extraído do site www.secil-group.com/

SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin - Value-added utilisation of waste glass in concrete. Cement and Concrete Research. . ISSN 00088846. 34:1 (2004) 81–89. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00251-5.

SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin - Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. Cement and Concrete Research.. ISSN 00088846. 36:3 (2006) 457–468. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.012.

SILVA, ANTÓNIO; FERNANDES, ISABEL; CASTRO, Nélia - A Petrografia na Avaliação da Reactividade de Agregados para Betão. 2006. 57–72.

TEODORO, Nuno Filipe Godinho - Contribuição para a Sustentabilidade na Construção Civil: Reciclagem e Reutilização de Materiais. 2011. 1–78.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Sendo o betão o material de construção mais utilizado do mundo e o cimento responsável por cerca de 10% das emissões de CO₂ produzidas pelo Homem, a necessidade de utilizar resíduos que possam substituir as matérias-primas, trazer benefícios económicos e obter o mesmo resultado implica uma aposta na investigação.

A existência, a nível mundial, de grandes quantidades de resíduos industriais tais como escórias de alto-forno, cinzas volantes, sílica de fumo e resíduos agrícolas como a cinza de casca de arroz, têm sido usados há muitos anos em larga escala como matérias-primas e constituintes na indústria cimenteira, sendo considerados na normalização internacional, ao contrário de outros como o resíduo de vidro (COUTINHO, 2015).

No entanto, o número de estudos que comprovam que este resíduo, apesar de não cumprir o limite de álcalis da norma portuguesa NP 4220, pode ser considerado como um material pozolânico é respeitável. Assim, o capítulo que se segue serviu de base para o desenvolvimento da dissertação através dos estudos que foram sendo apresentados, proporcionando um conhecimento maior sobre o comportamento do material, tendo em conta as propriedades de durabilidade e a resistência mecânicas.

2.2. RESÍDUO DE VIDRO

2.2.1. PRODUÇÃO DE VIDRO

A produção de vidro em Portugal conta com uma longa história, devidamente documentada pelo menos desde 1520, sendo um dos sectores industriais mais dinâmicos e atualizados (MENDES et al., 2008).

A indústria começou a concentrar-se, sobretudo por possuir matéria-prima em quantidade e qualidade, na Marinha Grande, localidade que pertence ao concelho de Leiria, sofrendo uma evolução tecnológica apreciável durante o século XIX, contribuindo para o desenvolvimento da própria região.

Durante o século XX o ritmo de criação de fábricas vidreiras cresceu, obrigando a fixá-las noutras localidades para além da Marinha Grande. De qualquer modo, foi então que aquela se transformou no

principal pólo de produção de vidro no país, tenho o número de vidreiras subido de 1, em 1888, para 14, em 1922 (MENDES et al., 2008).

A perda do mercado colonial, no pós-25 de Abril de 1974, entre outros fatores, levou a que os industriais vidreiros se dirigissem mais para o estrangeiro. No entanto, entre 1980 a 2000, assistiu-se, a nível interno, a uma consolidação e modernização do ramo vidreiro, e a nível externo, a uma progressiva internacionalização (MENDES et al., 2008).

No entanto, apesar de quase dois séculos de tradição, apenas 4 grandes fábricas restam na região, sendo que cerca de 80% deslocalizou-se para o estrangeiro. O futuro continua marcado por incertezas. Operários, empresários, sindicatos, instituições públicas locais e regionais acreditam que o futuro passa pela antecipação das tendências de design, transportando para o vidro exigentes conceitos de modernidade e qualidade.

De acordo com o CPIV- Comité de Permanent des Industries du Verre, entre 1997 e 2005 foram produzidas na União Europeia 32.606.730 toneladas de vidro, representando cerca de 35 mil milhões de euros.

Após a mistura das diferentes matérias-primas que constituem o vidro e da sua dosagem em função do objetivo final, inicia-se o processo de fusão a uma temperatura de cerca de 1550 °C. De seguida, inicia-se a moldagem do vidro. Nesta fase é realizado um tratamento térmico denominado de recozimento de forma a eliminar as tensões internas formadas nas fases anteriores. O passo seguinte consiste na inspeção e controlo de qualidade para deteção de defeitos, sendo o material rejeitado reintroduzido no processo sob a forma de casco. A última fase diz respeito à embalagem e expedição.

2.2.2. RECICLAGEM DO VIDRO

Sustentabilidade está a tornar-se o principal critério de seleção no mundo de negócios quando estão em causa novas construções (NUNES et al., 2013)

Por outro lado, o Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos, PERSU 2020, estabelece como meta, até 31 de Dezembro de 2020, alcançar 50% em peso relativamente à preparação para a reutilização e à reciclagem de resíduos urbanos como o vidro. Apesar destas recomendações, em 2016 o vidro, tal como nos anos anteriores não alcançou a respetiva meta mínima de 60% de reciclagem por uma diferença de 1%.

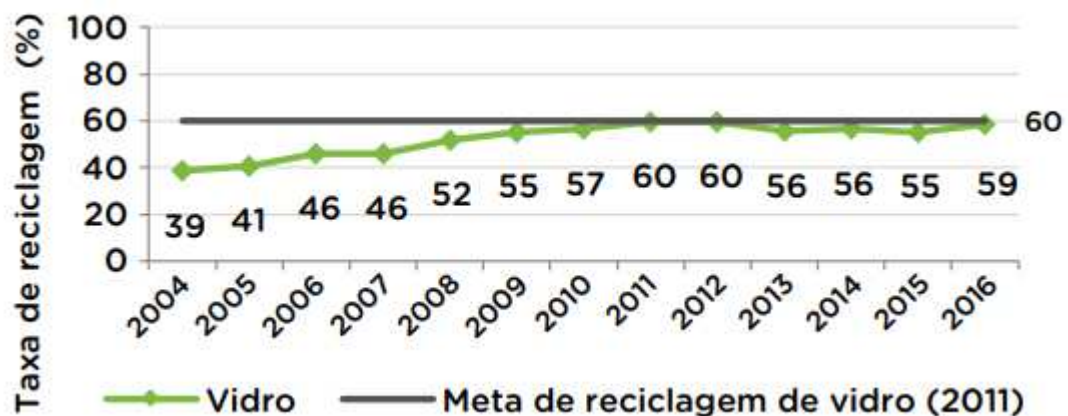


Figura 2.1: Meta a atingir para a produção de reciclagem (APA, 2017)

O processo de reciclagem é assegurado através da recolha seletiva, que resulta da deposição voluntária destes resíduos por parte da população em ecopontos, havendo uma entidade gestora em articulação com os sistemas multimunicipais e intermunicipais de gestão de resíduos urbanos, posteriormente sujeitos a triagem e encaminhamento para reciclagem. A eficiência do processo depende do método de recolha e triagem de vidro de cores diferentes. A associação de vidros com cores diferentes torna-os impróprios para a utilização como embalagens e, deixando de ser adequados para reciclagem com o propósito de formar novos produtos de vidro, o material pode ser moído ou mesmo pulverizado (MATOS, 2010).



Figura 2.2: Ciclo de vida do vidro (<https://letsreciclar.wordpress.com>)

A recolha do vidro usado tem adquirido uma grande importância, sobretudo devido a questões ambientais e económicas. A adição do casco permite uma considerável redução de resíduos sólidos, promovendo a redução das dificuldades na extração e utilização dos minerais que constituem as matérias-primas do vidro (MATOS, 2010).

No entanto, a constatação, em diferentes estudos realizados por diferentes autores, de que a incorporação de materiais pozolânicos em betão têm produzido resultados encorajadores relativamente às propriedades mecânicas e de durabilidade (MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012), abrindo a possibilidade do resíduo ser aplicado em outras áreas se cumprir determinadas propriedades.

2.3. PÓ DE VIDRO COMO MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO

2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As necessidades crescentes de utilização de material como cimento ou betão na indústria de construção de civil obrigaram a indústria a procurar novos materiais que substituíssem parcialmente o cimento e que respondessem aos diversos agentes agressivos de forma satisfatória.

A incorporação destes novos materiais no betão tem conduzido a resultados encorajadores no que diz respeito sobretudo à durabilidade. São vários os estudos que demonstram que adições como cinzas volantes ou de casca de arroz melhoram significativamente as diversas propriedades do betão. Materiais pozolânicos como resíduos de vidro surgem como mais uma opção, apresentando, em diversos estudos, resultados significativos. A investigação sobre o uso de vidro como substituto parcial iniciou-se na década 70, mas a acumulação contínua de resíduos e as preocupações ambientais levam a que a maior parte dos trabalhos sejam recentes (SHAYAN e XU, 2006).

Um material pozolânico pode apresentar como características essenciais, um elevado conteúdo em sílica no estado amorfo e uma elevada superfície específica. O vidro apresenta uma composição favorável por conter uma percentagem de cerca de 70% de sílica (SiO_2) no estado amorfo mas contém também uma menor percentagem de óxido de sódio (Na_2O) e de óxido de cálcio (CaO).

O elevado teor de álcalis no vidro suscita preocupação no que diz respeito à sua utilização como adição pozolânica em betão estrutural. Os álcalis do cimento Portland e a sílica de vidro reagem na presença de humidade resultando numa reação química denominada álcalis-sílica (ASR) (SERPA *et al.*, 2013). Para obviar a esta situação a norma NP 4220-2015 limita o valor dos álcalis em pozolanas para betão estrutural sendo que o vidro poderia ser considerado como uma pozolana se na sua composição o teor de sódio fosse menor, respeitando aquele requisito. No entanto, vários estudos demonstram que, quando o resíduo de vidro é utilizado como um pó finamente moído, as partículas finas de vidro reagem como um material pozolânico melhorando a resistência e a durabilidade do betão a longo prazo (MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012).

A utilização do resíduo de vidro como um pó finamente moído revela-se benéfico para o betão, mas a sua moagem representa um custo significativo.

2.3.2.ASR

A reação ASR origina expansões e consequentemente a deterioração do betão. O gel sílico-alcalino que se forma através da reação entre os álcalis do cimento e os constituintes do betão que sejam reativos (os agregados), migra pelas microfissuras, sendo capaz de se expandir com água e provocar tensões no interior do betão.

Em qualquer cimento ou adição é importante controlar o teor de óxido de sódio (Na_2O) em virtude da possibilidade da reação ASR (COUTINHO, 2011). A norma NP EN 196-2 designa o teor em álcalis (solúveis em ácido) como equivalente em óxido de sódio:

$$\text{Equivalente de NaOH (\%)} = \text{Na}_2\text{O}(\%) + 0,658 \text{ K}_2\text{O} \quad (2.1.)$$

Muitas estruturas construídas revelavam fissuração anos após a construção, fissuração que em alguns casos originou a ruína (MOREIRA, 2016).

Segundo Moreira, os parâmetros que influenciam este tipo de reações são:

- Reatividade do agregado;
- Quantidade e granulometria do agregado reativo;
- Tipo de cimento;
- Permeabilidade do betão;

- Concentração de álcalis na solução intersticial;
- Condições de exposição ambiental.

Para combater esta reação podem ser tomadas medidas como (MATOS, 2010):

- Não utilizar agregados com sílica reativa;
- Limitar, quando possível, a quantidade de álcalis vindos do exterior;
- Usar baixas razões água/ligante (betões mais compactos);
- Evitar humidade no betão, que é imprescindível para se dar a reação;
- Utilizar cimentos com teor de álcalis, expresso em óxido de sódio, inferior a 0,6% em relação à massa de cimento, utilizar pozolanas e adições em quantidade e qualidade suficiente.

Uma vez detetada a reação é muito difícil pará-la. A constatação da existência em Portugal de várias estruturas de betão afetadas por reações álcalis-sílica desencadeou a necessidade de avaliar a adequação dos métodos de ensaio utilizados.

Atualmente existem diferentes métodos de ensaio, uns que necessitam de intervenção muito especializada, caso da análise petrográfica, e outros de âmbito prático, caso dos ensaios de expansão.

O desempenho em serviço de um determinado agregado é considerado o método mais fidedigno para reconhecer a reatividade aos álcalis dum agregado para betão. A necessidade de obter, num curto espaço de tempo, informação acerca da reatividade do agregado, antes de ser utilizado numa determinada estrutura, obrigou à adoção de métodos acelerados e reprodutíveis (SILVA, FERNANDES e CASTRO, 2006).

A tabela apresentada a seguir resume as especificações de diferentes métodos, incluindo as principais vantagens e desvantagens de cada um deles.

Tabela 2.1: Métodos de ensaio para avaliação da reatividade aos álcalis de agregados para betão (SILVA, FERNANDES e CASTRO, 2008)

Método de ensaio	Modo operativo	Tipo de amostra	Critério de classificação	Vantagens e limitações
Análise petrográfica (ASTM C 295, LNEC E 415, RILEM AAR-1 [11])	Observação visual e ao microscópio petrográfico, complementada com outros métodos, como a difracção de raios X, análise térmica diferencial, espectrofotometria de infravermelhos ou microscopia electrónica.	Fragmentos, superfície polida, ou lâmina delgada.	Baseado na identificação e no teor de minerais reactivos aos álcalis.	- Rápido; - A confiança da análise depende da experiência do petrógrafo; - Dificuldade na identificação de alguns minerais reactivos; - Ausência dum 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.	- 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 a Exp. > 0.20%.	- Ensaio rápido (16 dias); - Permite avaliar a eficácia de adições minerais; - Não detecta a reactividade de agregados de reactividade lenta e retardada; - Considerado um ensaio severo, tem tendência a classificar como reactivos agregados com bom desempenho em serviço.
Ensaio de expansão de primas de betão (RILEM AAR-3)	Fabrico de provetes de betão com a combinação de agregados a ensaiar e com um teor em álcalis do betão de 5.5kg/m ³ , que depois são conservados em HR>95% e a 38° C durante 12 meses. Realização de medidas de expansão a idades definidas.	3 barras (prismas) de betão de dimensões 75 x 75 x 250 mm.	Reactivo se a 1 ano a Exp. > 0,05%.	- Ensaio lento; - Vantagem de se poder utilizar a composição de betão a empregar; - Permite avaliar a eficácia de adições minerais; - O limite de expansão parece ser efectivo apenas para agregados de 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 primas 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 de dimensões 75 x 75 x 250 mm.	Reactivo se às 20 semanas a Exp. > 0,03%.	- Desvantagem o tempo de resposta; - Vantagem de se poder utilizar a composição de betão a empregar; - Permite avaliar a eficácia de 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 [12].

A reacção ASR esteve sempre em foco quando se produziam argamassas de cimento com uma percentagem de resíduo de vidro moído. Vários estudos avaliam o uso de resíduos de vidro em betão como substituição parcial de agregados, filler ou a substituição parcial de cimento.

Shayan e Xu estudaram a influência da dimensão das partículas de vidro na ASR em barras de argamassas. Tal como estudos anteriores já tinham comprovado, apenas as partículas de maior dimensão causaram expansão.

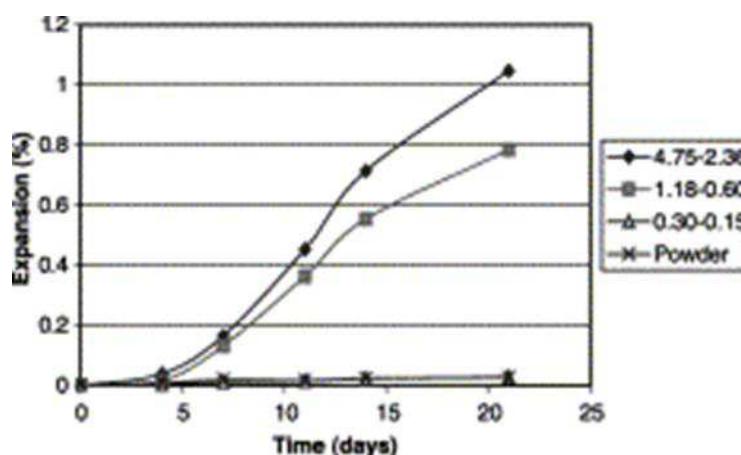


Figura 2.3: Curvas de Expansão em barras de argamassas contendo partículas de vidro com diferentes granulometrias (SHAYAN e XU, 2004)

Matos e Sousa, Coutinho optaram por utilizar e estudar resíduos diferentes como resíduos de vidro moído (WGP) e de sílica de fumo comercial (SF), cujas composições químicas e algumas características físicas se encontram na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Composição química do cimento e de WGP (MATOS e SOUSA-COUTINHO,2012)

	CEM I 45.2R	WGP	Silica fume
<i>Chemical composition (% mass)</i>			
LOI	2.61	0.92	
Insoluble residue	1.33		
SiO ₂	20.36	70	>99
Al ₂ O ₃	5.1	1.2	
Fe ₂ O ₃	3.12	0.65	
CaO	62.72	8.7	
MgO	1.81	3.7	
Na ₂ O		16	
K ₂ O		0.35	
Na ₂ O eq		17	
SO ₃	3.44	<0.05	
Cl	0.012	<0.005	
Free lime	1.62		
Pozzolanic activity		Positive	Positive
<i>Physical properties</i>			
Specific gravity (g/cm ³)	3.16	2.68	2.20
Soundness (mm)	≈0	≈0	≈0
<i>Initial setting time</i>			
WGP10/WGP20		2 h, 20 m/2 h, 15 m	
CTL	2 h, 30 m		
<i>Final setting time</i>			
WGP10/WGP20		3 h, 25 m/3 h, 25 m	
CTL	3 h, 25 m		

As argamassas de cimento com substituição parcial de 10 e 20% de WGP apresentaram resultados positivos, ou seja, uma redução da expansão. O comportamento do material permitiu concluir que a adição do material pozzolânico GP previne a expansão da ASR.

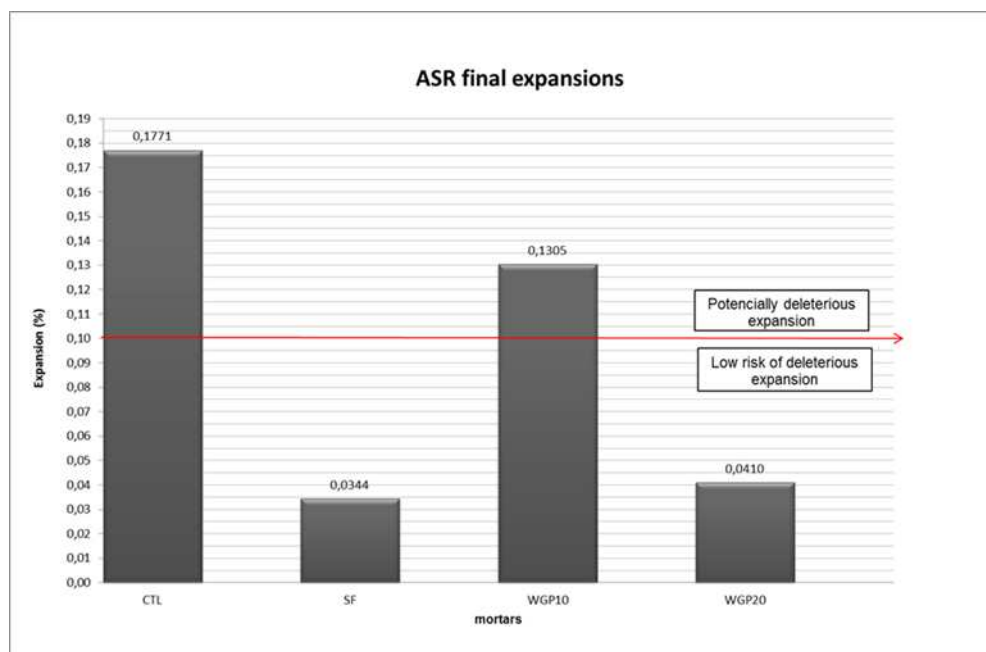


Figura 2.4: Expansões finais das argamassas aos 14 dias (MATOS e SOUSA-COUTINHO,2012)

O estudo de pó de vidro e a reação álcalis-silica no betão foi também analisada por Taha e Nounu, que utilizaram 20% de GP como substituto de cimento e analisaram a substituição de areia natural por areia de vidro reciclado com percentagens de 50 e 100%.

Tabela 2.3: Composição química dos materiais (TAHA e NOUNU, 2008)

Materials		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	SrO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃
Cement	CEM1	64.5	20.4	5.63	2.85	1.09	0.18	0.64	0.27	0.06	0.09	0.16	<0.05
	PGP	8.61	72.3	1.04	0.17	3.89	13.31	0.52	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Sand	SDS	7.11	78.6	2.55	2.47	0.46	0.42	0.64	0.15	0.10	<0.05	0.09	<0.05
	RGS	10.63	72.1	1.78	0.36	1.26	12.40	0.64	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	0.09

Os resultados demonstram que mesmo com um conteúdo de álcalis elevado, a expansão devido a ASR foi significativamente reduzida com a adição de GP. Segundo os autores, as possíveis explicações para o este fenómeno devem-se à:

- Influência do GP no processo de hidratação e nas reações químicas, levando à alteração da concentração e natureza da solução existentes nos poros e iões OH, atenuando a ASR;
- Dissolução rápida da sílica reativa presente no GP como material amorfo que reage com outras substâncias químicas para formar as fases minerais no betão, ou seja, a sílica reativa de GP dissolvida não fica disponível para a ASR, que ocorre em fases posteriores. No entanto, caso ocorra a ASR durante a etapa da reação pozolânica, a expansão produzida seria acomodada pela plasticidade do betão ainda fresco;
- Menor quantidade de cálcio no GP quando comparada com a quantidade no cimento Portland CEM I que origina uma quantidade de portlandite (Ca(OH)₂) produzida no betão que contém GP inferior aquela produzida com o betão que contém apenas cimento (betão menos alcalino e risco reduzido de ocorrer ASR);

- Forma como a maior parte do álcalis presente foi consumido como catalisador da reação pozolânica, sendo consumido na estrutura do gel de silicatos de cálcio hidratados mais cedo do que a ASR.

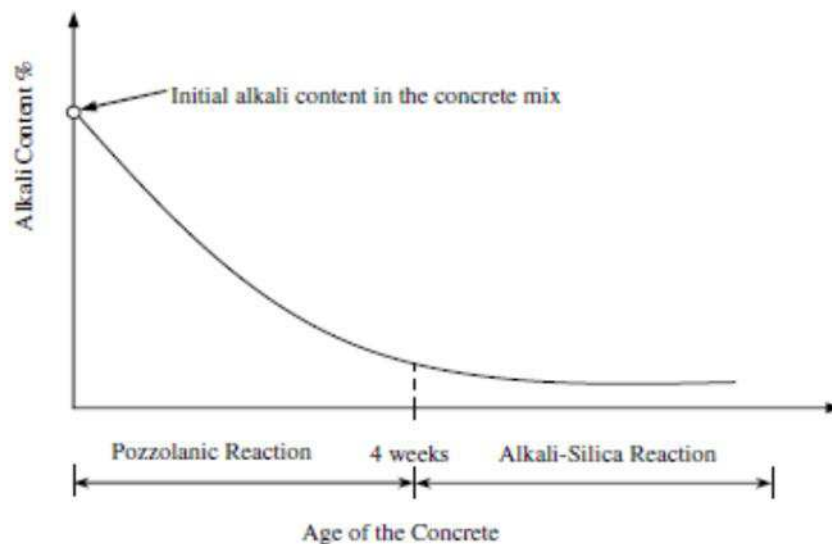


Figura 2.5: Modelo no consumo de álcalis na reação pozolânica (TAHA e NOUNU, 2008)

Khmiri, Chaabouni e Samet produziram sete argamassas diferentes: uma de controlo, cinco com 20% de substituição do cimento, mas todas com partículas de dimensões diferentes, de resíduo de vidro (WG) e uma última com 20% de sílica de fumo. Compararam a resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias das diferentes composições e analisaram a atividade pozolânica da adição, corroborando os resultados anteriores.

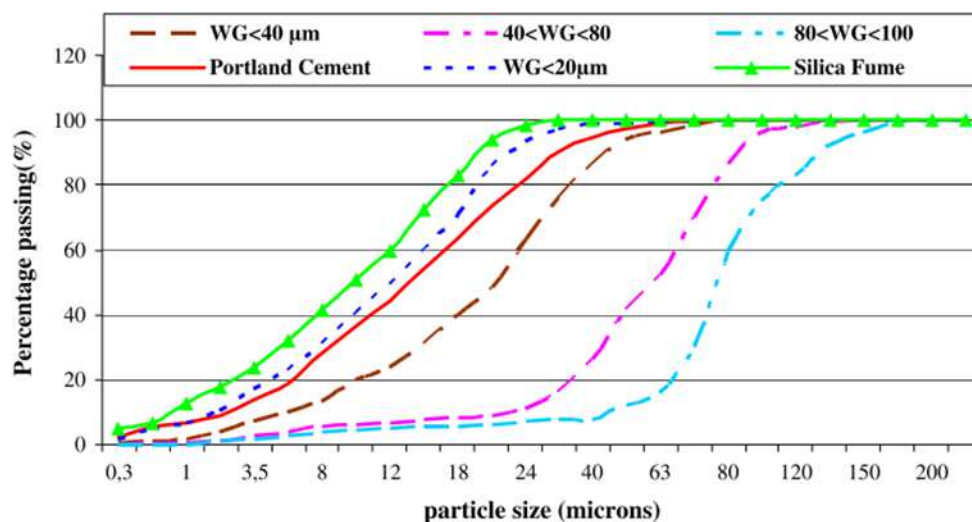


Figura 2.6: Granulometria de partículas finas de vidro de frações diferentes usadas em argamassas (KHMIRI, CHAABOUNI e SAMET, 2013)

Para identificar os diferentes produtos da reação pozolânica foram produzidas 5 amostras. Dessas amostras que continham óxido de cálcio e uma adição, 4 delas tinham WG com diferentes dimensões e outra com sílica de fumo, curadas a uma temperatura de 21° C em água durante 7, 28 e 90 dias.

Tabela 2.4: Composição química dos materiais utilizados (KHMIRI, CHAABOUNI e SAMET, 2013)

%wt	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
Waste glass	71.44	1.70	0.37	10.81	1.65	13.24	0.36	0.16	0.024	0.19
Silica fume	93.17	0.32	1.02	0.58	0.48	0.3	1.17	0.12	-	-
Cem I 42.5 N	20.59	6.62	3.54	63.61	1.39	0.13	0.61	1.94	-	-

A confirmação de que o material utilizado inibe o desenvolvimento da reação álcali-silica é feita pelas análises DSC, XRD e SEM de um sistema composto por 75% de resíduos de vidro e 25% de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) misturados com água, provando que a hidrólise de Si-O-Si ocorre com um pH elevado e leva à formação de silicato de cálcio insolúvel e aluminossilicato de cálcio, devido à adição de óxido de cálcio.

A difração por raios-X demonstra na amostra preparada com uma fração de vidro inferior a 20 µm vestígios de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio formados pelo contacto entre o óxido de cálcio e o dióxido de carbono atmosférico. O espectro entre 2θ 28 e 35° mostra maioritariamente silicatos de cálcio hidratados e aluminossilicatos hidratados, sobretudo abundantes aos 90 dias.

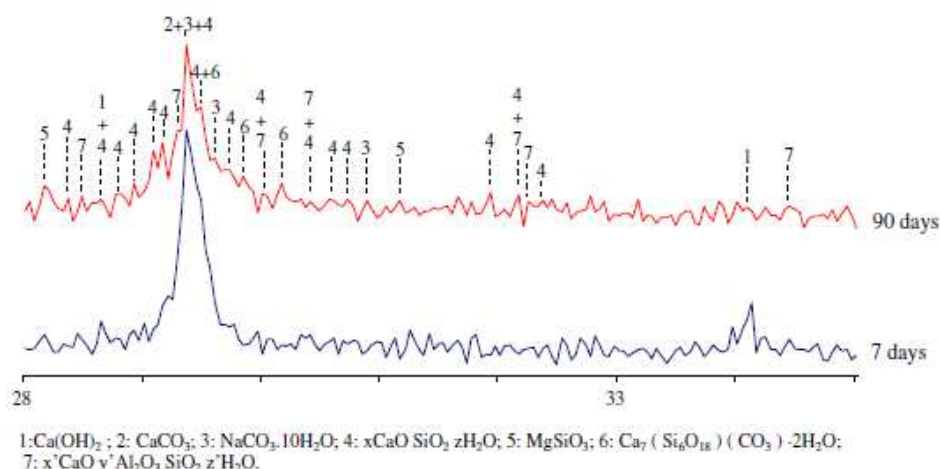


Figura 2.7: Difração por raios-X da amostra de WG (KHMIRI, CHAABOUNI e SAMET, 2013)

A presença de Na₂CO₃.10H₂O, após a carbonatação inicial do sódio presente no vidro que foi dissolvido pelo óxido de cálcio na solução hidratada, prova que a sílica não reage com o sódio para formar silicatos de sódio hidratados expansivos. Isto é, formam-se carbonatos hidratados de sódio evitando que o sódio de vidro esteja disponível para reagir com a sílica reativa.

A análise por calorimetria diferencial de varrimento nas mesmas amostras expôs 3 fenómenos. O primeiro entre os 70°C e os 120°C, onde existe remoção da água ligada fisicamente e da desidratação de silicato de cálcio hidratado. O segundo fenómeno ocorre a uma temperatura de 300°C, quando a sílica se mantém em contacto com o hidróxido de cálcio leva à formação de hidróxido de sílica causando a

dissolução de sílica. O último fenómeno observado, quando a temperatura atinge os 400°C a 500°C, é atribuído à decomposição de hidróxido de cálcio. Observou-se uma diminuição entre os 7 e 28 dias e desaparecimento aos 90 dias, provando a evolução da reação pozolânica.

A microscopia eletrónica de varrimento demonstrou que a utilização de pó de vidro com partículas inferiores a 20µm reage com hidróxido de cálcio, produzindo gel C-S-H, cujo teor aumenta ao longo do tempo.

Assim, perante o trabalho desenvolvido por Khmiri, Chaabouni e Samet e as suas respetivas conclusões, os resultados obtidos por Matos e Sousa-Coutinho são corroborados.

2.3.3. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

A resistência mecânica é a propriedade mais importante em termos de utilização estrutural pelo que todas as normas fixam valores mínimos desta característica. Como a resistência depende, em elevado grau, das condições de amassadura, da preparação dos provetes, da natureza do ensaio escolhido entre outros, é necessário prescrever a maneira exata de ensaiar o cimento, de modo a obter resultados comparáveis (COUTINHO, 1998).

A avaliação da resistência à flexão e à compressão aos 180 dias utilizando resíduos de vidro foi estudado por Matos e Sousa-Coutinho, estudo referido anteriormente, que seguiu a norma NP EN 196-1. A avaliação da resistência dos provetes de controlo e dos provetes com uma substituição de 10% de pó de vidro realizou-se até aos 562 dias.

A figura 2.8 apresenta os valores obtidos para as datas referenciadas anteriormente. As argamassas que contêm resíduos de vidro apresentam uma menor resistência aos 7 e 28 dias, quando comparadas com as de controlo. No entanto, aos 90 dias as argamassas que contêm vidro na sua constituição apresentam resultados semelhantes aos das argamassas de controlo. O estudo mencionado demonstra ainda que, quando a substituição atinge os 20%, a resistência aos 28 e 90 dias aumenta consideravelmente, sendo demonstrativa da ocorrência da reação pozolânica.

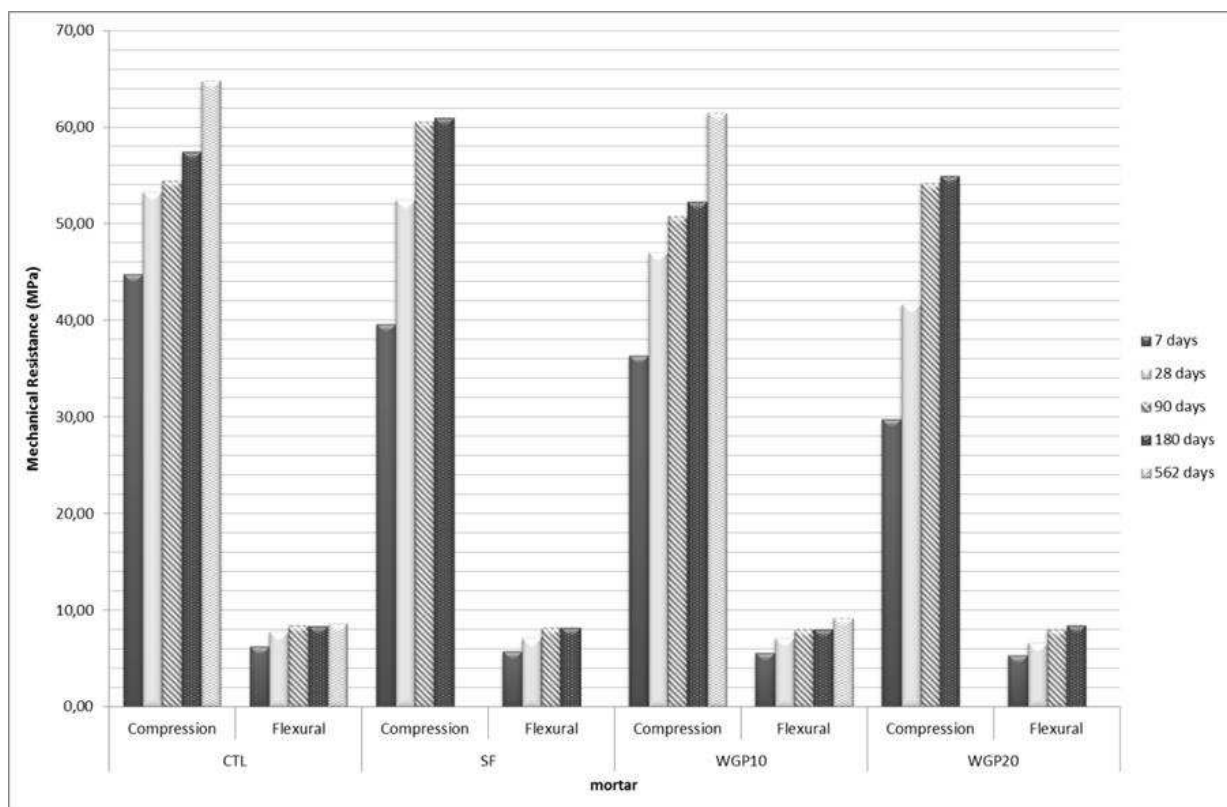


Figura 2.8: Resistência à compressão e flexão (MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012)

De forma a avaliar a incorporação de resíduos de vidro em betão, Shayan e Xu testaram a resistência à compressão de betão utilizando 10 composições diferentes com pó de vidro proveniente de resíduos de recipientes de vidro (GP) como substituto parcial do cimento (substituição de 20 e 30%) e ainda areia de vidro como substituição da areia natural (substituição de 40 e 75%).

A composição média do resíduo, em percentagem, é a seguinte: SiO_2 (72,4), Al_2O_3 (1,45), Fe_2O_3 (0,48), CaO (11,5), MgO (0,65), Na_2O (13,0), K_2O (0,43), SO_3 (0,09) (SHAYAN e XU, 2006).

A mistura 1 contém 100% de cimento, correspondendo à mistura de controlo, CTL, e as misturas 3 e 4 correspondem a betões em que o cimento foi substituído por 20 e 30% de GP, respetivamente. A análise à figura 2.9 demonstra que as misturas 3 e 4 apresentam uma resistência sempre inferior à mistura de controlo.

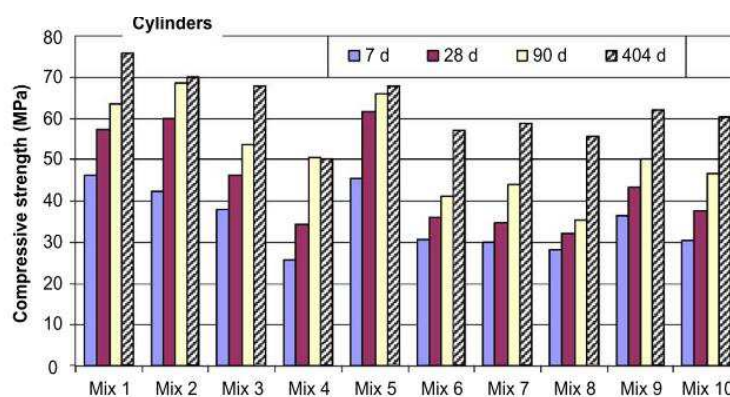


Figura 2.9: Resistência à compressão em cilindros para várias idades (SHAYAN e XU, 2006)

Matos *et al.* foram ainda mais longe na utilização de resíduos de pó de vidro, utilizando-o como substituto de filler na produção de betão auto compactável (SCC). Produziram dois tipos de betão, um de controlo (CTL SCC) e outro com pó de vidro como substituto de filler (BGP SCC).

Tabela 2.5: Composição química do cimento e do resíduo de pó de vidro (MATOS *et al.*, 2016)

	CEM I 42.5 R	BGP
LOI	2,61	0,69
Insoluble residue	1,33	
SiO ₂	20,36	72,69
Al ₂ O ₃	5,1	0,67
Fe ₂ O ₃	3,12	0,47
CaO	62,72	8,72
MgO	1,81	3,70
Na ₂ O		12,22
K ₂ O		0,21
TiO ₂		<0,04
MnO		<0,02
P ₂ O ₅		<0,03
SO ₃	3,44	1,30
Cl	0,012	
Free lime	1,62	
Pozzolanicity		Positive

Para as duas composições, avaliaram o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do betão aos 7, 28 e 83 dias, cujos valores estão representados na figura 2.10 e 2.11.

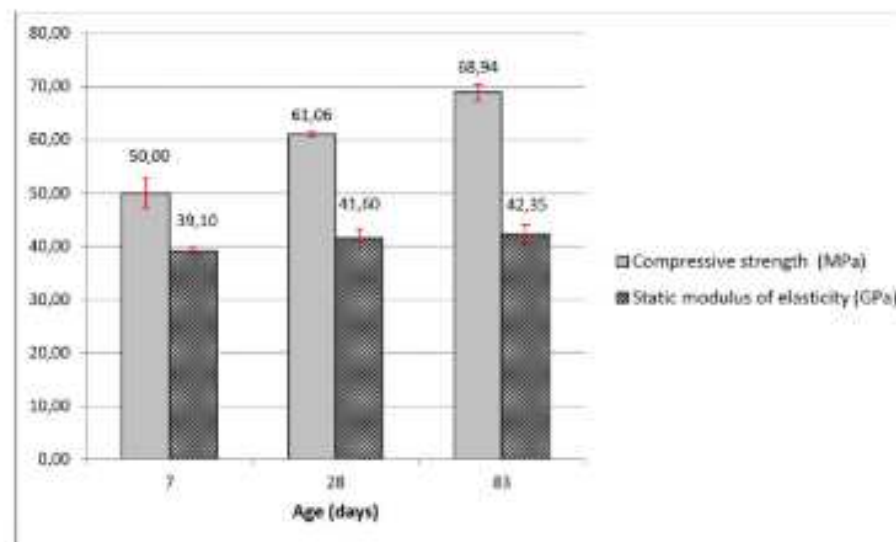


Figura 2.10: Resistência à compressão CTL SCC (MATOS *et al.*, 2016)

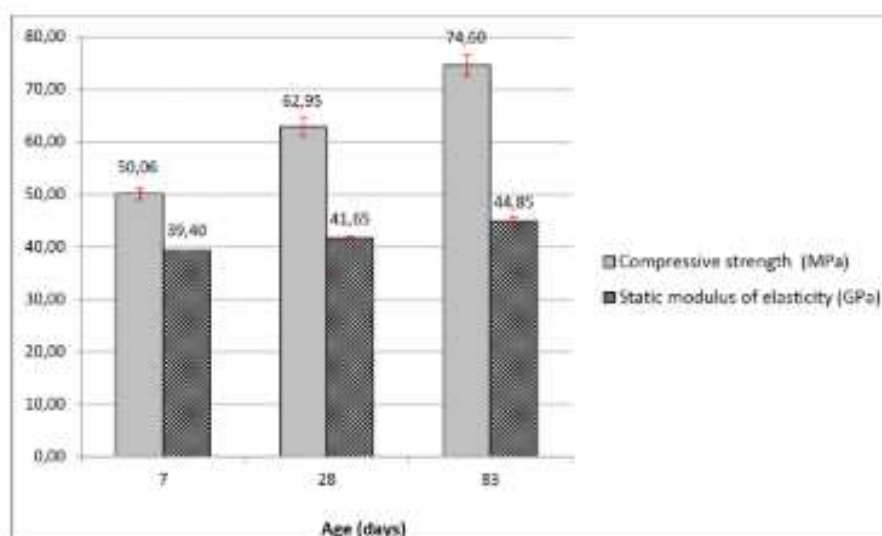


Figura 2.11: Resistência à compressão BGP SCC (MATOS *et al.*, 2016)

A composição BGP SCC atinge aos 83 dias valores de resistência à compressão mais alto que a de controlo, acontecendo o mesmo com o módulo de elasticidade mas de forma menos pronunciada. A diferença entre os valores de resistência à compressão resulta da natureza pozolânica do pó de vidro e do seu comportamento ao longo do tempo e da finura do material em estudo (MATOS *et al.*, 2016).

Mais recentemente, Aliabdo, Abd Elmoaty e Aboshama optaram por realizar uma série de estudos utilizando pó de vidro separado a partir da demolição de diferentes edifícios e da moagem de recipientes triturados, produzindo betão com o cimento e com o resíduo de vidro com cujas composições se apresentam na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Composição química do cimento e do pó de vidro (ALIABDO, ABD ELMOATY e ABOSHAMA, 2016)

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL ⁻	LOI
Cement	21.73	3.60	1.50	63.20	3.20	2.50	0.27	0.96	0.03	1.90
Glass powder	71.40	2.54	0.37	11.2	1.60	0.16	0.36	12.25	0.04	0.82

Foram produzidos vários tipos de betões usando o pó de vidro quer como substituto de cimento quer como adição, como demonstra a tabela 2.7.

Tabela 2.7: Composição dos diferentes betões produzidos (ALIABDO, ABD ELMOATY e ABOSHAMA, 2016)

Proportions of concrete mixtures.

Mix no.	Notes	Cement (kg/m ³)	Glass powder (%)	Glass powder (kg/m ³)	Water content (kg/m ³)	w/cementitious ratio	Sand (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)
1	Control Mix 1	350	0.0	0	175.0	0.50	723	1084
2	Cement Replacement	332.5	5.0	17.5	175.0	0.50	721	1082
3		315.0	10	35.0	175.0	0.50	720	1080
4		298.0	15	52.0	175.0	0.50	718	1078
5		280.0	20	70.0	175.0	0.50	717	1076
6		262.5	25	87.5	175.0	0.50	716	1074
7	Cement Addition	350.0	5.0	17.5	175.0	0.50	716	1073
8		350.0	10	35.0	175.0	0.50	709	1063
9		350.0	15	52.0	175.0	0.50	702	1053
10		350.0	20	70.0	175.0	0.50	695	1042
11		350.0	25	87.5	175.0	0.50	688	1032
12	Control Mix 2	450.0	0.0	0	157.5	0.35	706	1059
13	Cement Replacement	427.5	5.0	22.5	157.5	0.35	704	1056
14		405.0	10	45.0	157.5	0.35	703	1054
15		382.5	15	67.5	157.5	0.35	702	1052
16		360.0	20	90.0	157.5	0.35	700	1050
17		337.5	25	112.5	157.5	0.35	698	1048
18	Cement Addition	450.0	5.0	22.5	157.5	0.35	697	1045
19		450.0	10	45.0	157.5	0.35	688	1032
20		450.0	15	67.5	157.5	0.35	679	1019
21		450.0	20	90.0	157.5	0.35	670	1005
22		450.0	25	112.5	157.5	0.35	661	992

Os ensaios realizados aos 7,28 e 56 dias demonstram que a resistência à compressão e à tração aumentam cerca de 10% para a percentagem de substituição do cimento até 10%. O uso de pó de vidro com percentagens de substituição superiores a 15% implica um decréscimo da resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 2.8: Resistência à compressão (ALIABDO, ABD ELMOATY e ABOSHAMA, 2016)

Concrete grade	Age	Replacement level	Experimental test results (Mpa)			Average (MPa)	Standard deviation (MPa)	Coefficient of variation (%)
			Specimen No. 1	Specimen No. 2	Specimen No. 3			
33 Mpa	7 days	0	28.59	28.04	29.47	28.70	0.72	2.51
		5	30.38	29.98	29.95	30.10	0.24	0.80
		10	27.50	27.90	26.73	27.38	0.59	2.17
		15	26.41	26.68	27.58	26.89	0.61	2.28
		20	26.43	25.84	26.00	26.09	0.31	1.17
	28 days	25	25.30	25.42	25.41	25.38	0.07	0.26
		0	32.00	32.11	32.49	32.20	0.26	0.80
		5	34.09	34.01	33.41	33.84	0.37	1.10
		10	30.05	30.96	31.24	30.75	0.62	2.02
		15	29.91	29.01	28.63	29.18	0.66	2.25
	56 days	20	28.19	27.59	28.53	28.10	0.48	1.69
		25	28.04	27.59	26.09	27.24	1.02	3.75
		0	35.56	33.35	34.59	34.50	1.11	3.21
		5	35.71	35.79	36.78	36.09	0.60	1.65
		10	32.02	31.91	32.19	32.04	0.14	0.44
45 Mpa	7 days	15	31.28	30.99	31.19	31.15	0.15	0.48
		20	30.96	30.97	29.80	30.58	0.67	2.20
		25	29.99	29.30	28.59	29.29	0.70	2.39
	28 days	0	36.68	36.94	35.86	36.49	0.56	1.54
		5	35.59	36.40	37.27	36.42	0.84	2.31
		10	39.08	38.37	38.08	38.51	0.51	1.34
		15	36.23	36.29	36.16	36.23	0.07	0.18
	56 days	20	33.09	34.65	34.52	34.09	0.87	2.54
		25	33.02	33.00	31.78	32.60	0.71	2.18
		0	44.02	44.50	44.45	44.32	0.26	0.60
		5	45.42	45.39	45.45	45.42	0.03	0.07
		10	46.90	46.00	46.45	46.45	0.45	0.97
	7 days	15	40.02	39.97	40.42	40.14	0.25	0.61
		20	38.09	39.96	40.11	39.39	1.13	2.86
		25	38.00	37.96	38.29	38.08	0.18	0.47
	28 days	0	46.02	45.02	45.50	45.51	0.50	1.10
		5	47.09	48.00	49.14	48.08	1.03	2.14
		10	48.23	49.19	50.13	49.18	0.95	1.93
		15	43.10	43.10	43.25	43.15	0.09	0.20
		20	40.77	41.49	41.10	41.12	0.36	0.88
		25	38.89	39.73	40.58	39.73	0.85	2.13

2.3.4. PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Se a penetração de cloretos através da camada de recobrimento for suficiente para atingir as armaduras, aí ultrapassando uma certa concentração, a película finíssima que as protege (camada de passivação) pode ser destruída e permitir o início da corrosão se as condições de humidade e oxigénio forem favoráveis. A oxidação provoca não só a diminuição da secção como também expansões (COUTINHO, 1998).

Alguns iões cloreto que penetram no betão reagem quimicamente com componentes da pasta cimentícia, enquanto outros iões cloreto são adsorvidos à superfície dos poros do betão sendo os restantes iões aqueles que são relevantes em termos de corrosão das armaduras. Os iões cloreto intervêm nas reações e aceleram a dissolução do ferro (COUTINHO, 1998).

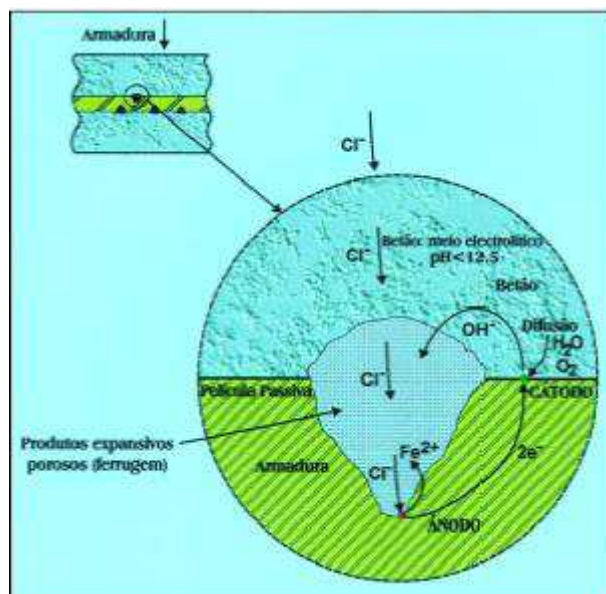


Figura 2.12: Corrosão da armadura por "picadas" pelos cloretos (COUTINHO, 1988)

Existem vários métodos para avaliar a permeabilidade aos cloretos que são habitualmente usados. O ensaio rápido de permeabilidade aos cloretos (RCP) e o ensaio por migração não estacionário (NSSM) são os mais utilizados.

O ensaio rápido da permeabilidade aos cloretos, baseado na norma ASTM C 1202 expressa um índice de penetração de íons cloreto no betão a partir da indicação da resistividade ou condutividade do betão. Uma diferença de potencial de 60V é aplicada entre elétrodos colocadas em ambas as faces do provete, que tem 50 milímetros de espessura, previamente acondicionados pela saturação em vácuo. Estes são colocados numa célula ladeada por reservatórios que contém uma solução de hidróxido de sódio e uma solução de cloreto de sódio. O valor do ensaio de RCP é a taxa total, em coulombs, da carga elétrica que passa ao final de 6h. O ensaio RCP acaba por medir a resistividade do betão, que depende da estrutura dos poros e da composição da solução dos poros.

Por sua vez, o ensaio NSSM, baseada na norma NT Build 492, na qual se fundamenta a especificação LNEC E-463, prevê um pré-condicionamento numa solução saturada de hidróxido de cálcio, sendo que a duração do ensaio depende da corrente inicial registada quando se aplica um potencial elétrico de 30V. As soluções utilizadas são de cloreto de sódio e de hidróxido de sódio. Findo o período de ensaio determinado anteriormente, a amostra é dividida ao meio por compressão diametral e uma solução de nitrato de prata é pulverizada sobre as secções. A profundidade de penetração de cloretos é medida a partir da precipitação de cloreto de prata branca visível.

Em betão, é possível utilizar as tabelas seguintes para caracterização da resistência à penetração de cloretos.

Tabela 2.9: a) Resistência à penetração de cloretos baseado nos resultados do ensaio NT Build 492
b) Penetração de cloretos de acordo com a carga passada através dos provetes-RCP

a)		b)	
D_{nm} ($10^{-12} m^2/s$)	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

Segundo a norma NP EN 197-1, o teor em cloretos no cimento deverá ser inferior a 0,1% da massa do cimento. Em relação ao betão armado e betão pré-esforçado consideram-se os valores de 0,4% e 0,2% da massa do cimento, respetivamente, como valor limite crítico do teor de cloretos em todo o betão, segundo a norma NP EN 206-1 (2012).

Shayan e Xu, cujo estudo já foi referido anteriormente e que realizaram vários tipos de ensaios em diferentes composições de betão, avaliaram a penetração de cloretos nas misturas de betão que continham pó de vidro com percentagens de substituição de 20% e 30%. Os valores registados para o ensaio rápido foram significativamente menores que os da mistura de referência (Mix 1) e semelhantes aos que continham sílica de fumo (Mix 2 e 5). Os valores da carga passada em coulombs nos provetes cilíndricos submetidos a cura húmida foram mais baixos do que os carotes extraídos de lajes, provavelmente devido à cura natural ser menos eficaz que a cura húmida em laboratório.

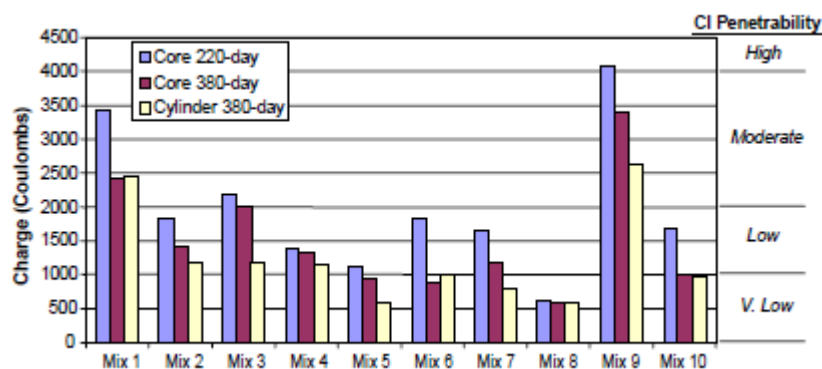


Figura 2.13: Resultados do ensaio RCP (SHAYAN e XU, 2006)

As misturas que continham pó de vidro na sua composição (Mix 3,4,6,7,8 e 10) apresentam, segundo os autores, uma permeabilidade aos cloretos significativamente mais baixa do que a mistura de controlo (Mix 1) e até mesmo as misturas que continham sílica de fumo na sua composição (Mix 2 e 5). A mistura 9, que continha 50% de vidro moído como substituto parcial da areia, apresentou valores muito superiores quando comparada com os restantes.

De forma semelhante ao estudo anterior, Omran *et al.* avaliaram, determinadas propriedades em betão produzido com GP, desde o módulo de elasticidade à resistência da penetração de cloretos. Motivados pelos bons resultados apresentados em laboratório por diferentes autores em diferentes condições,

conduziram a aplicações à escala real. Os resultados de provetes extraídos de elementos estruturais construídos entre 2006 e 2011 foram comparados com provetes extraídos desses mesmos elementos estruturais mas com cura realizada em ambiente laboratorial. A composição química e as características físicas dos materiais utilizados durante o estudo encontram-se na tabela seguinte.

Tabela 2.10: Propriedades físicas e químicas do cimento, pó de vidro, sílica de fumo e cinzas volantes (OMRAN *et al.*,2017)

		Type GU Cement	Type GUB-S/SF cement	Glass powder	Silica fume	Class F fly ash
Physical property	Fineness (retained on 45 µm, %)	–	–	0	–	10
	Maximum particle size (d_{max}) (µm)	–	–	40	–	–
	Mean particle size (d_{50}) (µm)	–	–	12	0.15	13
	Blaine specific surface (m^2/kg)	394	–	382*	20000	410
	Specific gravity	3.15	–	2.54	2.2	2.53
	Water absorption	–	–	0%	–	–
	Color	–	–	White	–	–
	Morphology	–	–	Angular particles	–	–
Chemical properties in % of total	Silicon oxide (SiO_2)	19.9	33.8	74.07	99.8	52.4
	Aluminum oxide (Al_2O_3)	4.7	10.4	1.97	0.11	27.2
	Iron oxide (Fe_2O_3)	3.0	3.4	0.44	0.09	8.3
	Calcium oxide (CaO)	62.7	44.0	13.56	0.40	4.5
	Magnesium oxide (MgO)	2.1	1.4	1.26	0.20	0.96
	Sulfate trioxide (SO_3)	3.4	2.6	0.20	–	0.05
	Potassium oxide (K_2O)	0.95	–	0.62	0.50	2.33
	Sodium oxide (Na_2O)	0.18	–	7.19	0.20	0.20
	Loss on ignition (LOI) at 800 °C	2.4	2.1	0.47	3.5	2.2
	Tricalcium silicate (C_3S)	58.2	–	–	–	–
	Dicalcium silicate (C_2S)	13.1	–	–	–	–
	Tricalcium aluminate (C_3A)	7.4	–	–	–	–
	Tetracalcium ferroaluminate (C_4AF)	9.3	–	–	–	–
	Alkali equivalent $Na_2O + 0.658 \times K_2O$	0.9	0.7	7.60	–	1.7

* Average fineness of different glass powders.

No total foram produzidas 11 composições diferentes para as lajes interiores (Indoor slabs), exteriores (Sidewalks) e para as paredes estruturais (Walls), representadas na tabela 2.11.

Tabela 2.11: Composição dos diferentes elementos estruturais estudados (OMRAN *et al.*,2017)

Materials	Indoors						Outdoors				
	Slabs						Sidewalks		Walls		
	SAQ-GP	SAQ-Ref.	CSD-Int. Slab.GP	CSD-Int. Slab.Ref.	UofS-GP	UofS-FA	CSD-Ext. Sdk.GP	CSD-Ext. Sdk.Ref.	Tri-Gat-Wall#1-10%GP	Tri-Gat-Wall#2-30%GP	Tri-Gat-Wall#3-Ref
Cement, Type GU (kg/m^3)	263	–	280	264	–	–	320	435	270	245	–
Cement, Type GUB-S/SF (kg/m^3)	–	226	–	–	320	320	–	–	–	–	–
Glass powder, Tricentris, GP (kg/m^3)	70	–	70	–	80	–	80	–	30	105	–
Silica fume (kg/m^3)	17	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Class F fly ash (kg/m^3)	–	25	–	78	–	80	–	–	–	–	–
Water (L/m^3)	175	170	168	165	160	160	168	175	154	168	–
Total binder (kg/m^3)	350	251	350	342	400	400	400	435	300	350	–
GP/total binder	0.20	–	0.20	–	0.20	–	0.20	–	0.10	0.30	–
Silica fume / total binder	0.05	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Class F fly ash / total binder	–	0.10	–	0.23	–	0.20	–	–	–	–	–
w/cm (kg/m^3)	0.50	0.68	0.48	0.48	0.40	0.40	0.42	0.38	0.50	0.48	–
Sand (kg/m^3)	827	993	825	966	797	782	688	728	820	770	–
Aggregate, 5–10 mm (kg/m^3)	–	–	–	–	370	370	–	–	–	–	–
Aggregate, 5–14 mm (kg/m^3)	482	450	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Aggregate, 5–20 mm (kg/m^3)	588	549	1070	950	700	700	1040	1007	1057	1025	–

Por cada mistura de referência que continha uma determinada percentagem de cinzas volantes como substituto do cimento, foi produzida uma mistura com uma determinada percentagem de pó de vidro. Para as lajes interiores e exteriores essa percentagem foi de 20% e para as paredes estruturais foi de 10 e 30%.

Os valores da resistência mecânica e da resistência à penetração de cloretos demonstraram uma evolução significativa devido à sua reação pozolânica. Os valores da resistência à penetração de cloretos aos 28 e 91 dias obtidos em laboratório foram comparados com os valores de amostras do núcleo dos elementos estruturais.

No que diz respeito às lajes interiores, as misturas que continham GP demonstraram uma melhoria da resistência à penetração de cloretos comparativamente com as de referência e ao longo do tempo, confirmando o desenvolvimento da reação pozolânica.

As misturas de referência das lajes exteriores também apresentaram um comportamento semelhante ao das lajes interiores. De referir ainda que os provetes extraídos desses elementos estruturais ainda que sujeitos a condições adversas, permitiram que a reação pozolânica se desenvolvesse.

Por sua vez, os provetes das paredes estruturais apresentaram melhor comportamento quando a percentagem de substituição for aumentada para 30%. Uma maior percentagem de pó de vidro suprime o efeito de uma compactação deficiente, que associada a um tempo de cura adequado, permite obter melhores resultados.

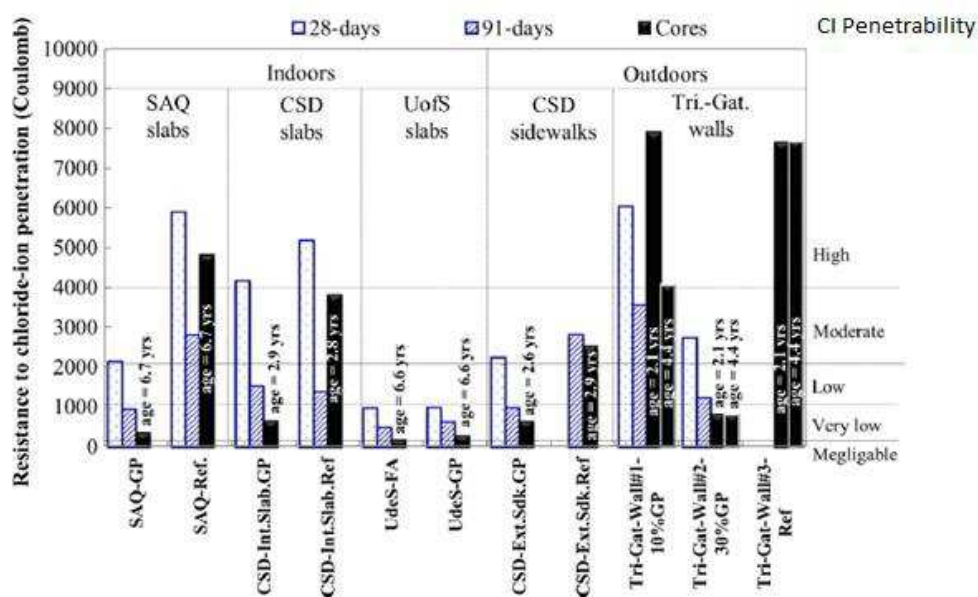


Figura 2.14: Resistência à penetração de cloretos (OMRAN *et al.*, 2017)

Um tempo de cura adequado, sobretudo quando se trata de elementos exteriores, permite que o GP no betão continue a desenvolver produtos de hidratação secundários, densificando a sua rede porosa (OMRAN *et al.*, 2017).

2.3.5. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

A maior ou menor facilidade da água penetrar nos poros e fendas do betão é uma característica fundamental para avaliar a durabilidade do betão. A água é o principal meio de transporte de substâncias que se podem revelar nocivas para o betão.

Matos e Sousa-Coutinho, cujo estudo já foi mencionado anteriormente, avaliaram a absorção por capilaridade em provetes cilíndricos, previamente curados e depois colocados numa estufa a 40°C até massa constante. Os mesmos provetes foram colocados num reservatório com um nível de água de 3mm com a face da cofragem em contacto com a água, sendo esta absorvida por capilaridade. Em intervalos de tempo até 4,5h a massa dos provetes era registado e aos resultados foi aplicada por regressão linear, a equação seguinte:

$$A = A_0 + St^{0,5} \quad (2.2.)$$

Onde:

A é a absorção de água (mg/mm²);

A₀ é a água absorvida inicialmente pelos poros em contacto com a água (mg/mm²);

S é o coeficiente de absorção capilar (mg/(mm².min^{0,5})) é o tempo decorrido

Os resultados apresentados na figura 2.15 são praticamente iguais, pelo que esta propriedade não permitiu distinguir as diferentes redes porosas.

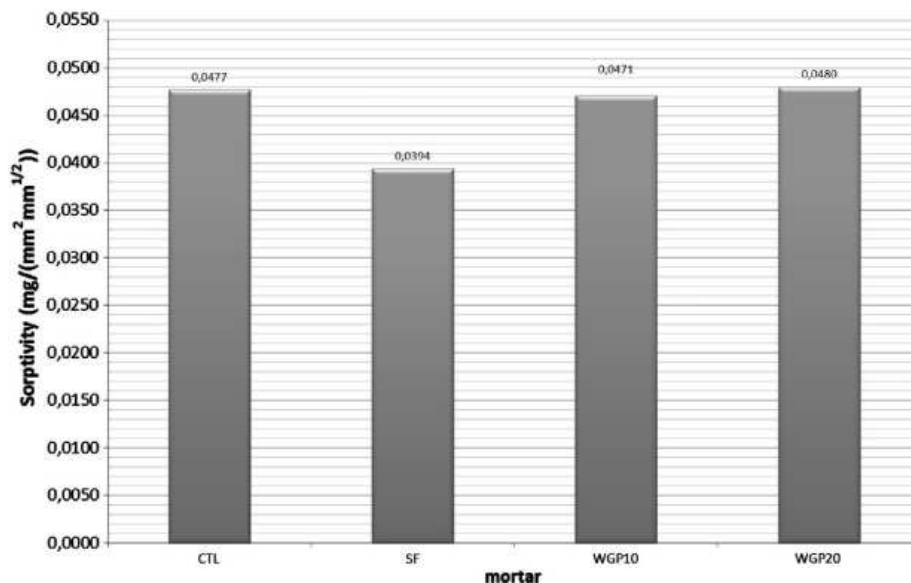


Figura 2.15: Coeficiente de absorção para cada argamassa (MATOS e SOUSA-COUTINHO,2012)

2.3.6. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A crescente preocupação com a corrosão das armaduras tornou a resistividade elétrica um importante indicador da durabilidade. Este indicador relaciona a suscetibilidade do betão para, por exemplo, a penetração de cloretos numa fase inicial.

Matos *et al.*, estudo já mencionado anteriormente, produziu betão autocompactável recorrendo a resíduos de pó de vidro como substituto de filler (BGP SCC), estudando a resistividade elétrica através da aplicação da lei de Ohm.

Foram determinados os valores aos 7, 28 e 83 dias, apresentados na tabela 2.12, mantendo todos os provetes nas mesmas condições, ou seja, saturados e à mesma temperatura, que demonstram que o uso de adições aumenta a resistividade, permitindo ainda comparar a estrutura porosa e a interconectividade da matriz cimentícia.

Tabela 2.12: Resultados da resistividade elétrica (MATOS *et al.*, 2016)

Age of concrete (days)/ Resistivity (kΩ.cm)	CTL	BGP
7	5,36	5,31
28	7,51	11,85
83	10,00	26,90

2.3.7. CARBONATAÇÃO

A carbonatação do betão é um processo que resulta da reação do dióxido carbono (CO₂) do ar que reage com os hidróxidos da fase aquosa do betão. O CO₂ dissolve-se na água dando origem a ácido carbónico (H₂CO₃).

A reação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) com o ácido carbónico é a principal razão para a diminuição do pH do betão para valores inferiores a 9 (MOREIRA, 2016).

O CO₂ da atmosfera penetra no betão sobretudo por difusão. A carbonatação vai avançando, havendo substituição de Ca(OH)₂ por CaCO₃ (carbonato de cálcio), diminuindo a porosidade superficial do betão. O teor de humidade e a temperatura, a porosidade e simetria do betão ou o conteúdo do betão em matéria carbonatável são fatores que podem influenciar a profundidade de carbonatação do betão.

Existem numerosos modelos mais ou menos complexos que representam a evolução da profundidade de carbonatação no tempo, mas o fenómeno pode ser traduzido pela lei seguinte (COUTINHO, 1998):

$$x = k_c \cdot \sqrt{t} \quad (2.3.)$$

Onde:

x é a profundidade de carbonatação (m);

k_c é a constante que depende da concentração de CO₂, da temperatura, da humidade relativa e do coeficiente de difusão (m/s^{0.5});

t é o tempo (anos).

A avaliação da profundidade de carbonatação é realizada pela aplicação de um indicador de fenolftaleína, apresentando um cor púrpura ou rosa forte se o pH for superior a 8,9 ou incolor se for inferior a 8,9.

Matos e Sousa-Coutinho avaliaram a profundidade de carbonatação em argamassas produzidas com diferentes níveis de substituição do cimento (10% e 20%) utilizando o método descrito anteriormente. Os provetes, colocados numa câmara de carbonatação acelerada, foram expostos em condições de humidade relativa de $60 \pm 5\%$, temperatura de $23 \pm 3^\circ\text{C}$ e de $5 \pm 0,1\%$ de dióxido de carbono.

Após a serragem dos provetes, os mesmos foram pulverizados por uma solução alcoólica de fenolftaleína, sendo os resultados apresentados na figura 2.16.

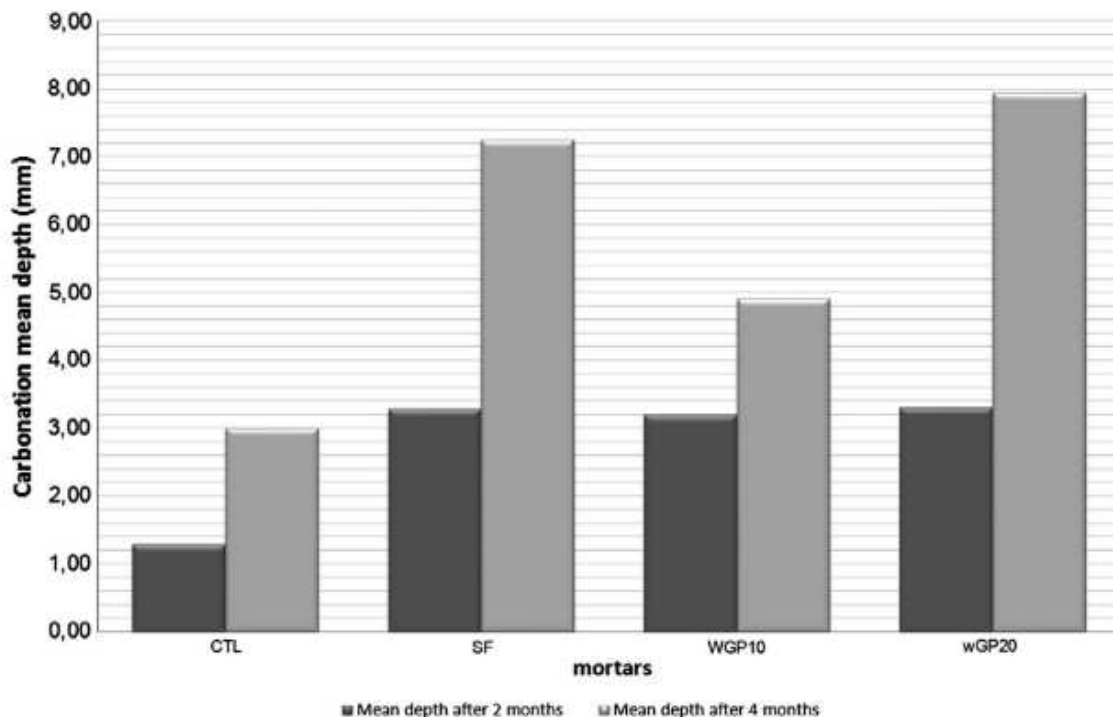


Figura 2.16: Profundidade de carbonatação depois de 2 e 4 meses na câmara de carbonatação

Tanto o resíduo de vidro como a sílica de fumo conduziram a valores mais elevados do que a mistura de controlo, sendo que quando os níveis de substituição atingem os 20%, os valores referentes a resíduos de vidro (WGP) aproximam-se dos valores relativos à sílica de fumo (SF). Os autores acreditam que estes resultados são justificados pela reação pozolânica e consequente diminuição de hidróxido de cálcio.

Nunes *et al.*, 2013 avaliaram a resistência à carbonatação em betão autocompactável (SCC) produzido com pó de vidro moído oriundo da reciclagem de vidros utilizados na indústria automóvel.

A avaliação da resistência à carbonatação baseou-se no procedimento descrito na especificação do LNEC E391. Os provetes foram sujeitos a um tempo de cura de 28 dias e colocados numa sala com temperatura e humidade controladas ($20 \pm 0,3$ e $50 \pm 3\%$, respetivamente) durante 14 dias. O próximo passo passou pela colocação das amostras numa câmara de carbonatação acelerada com condições de

exposição muito específicas (humidade relativa de $60 \pm 0.5\%$, temperatura de $23 \pm 3^\circ\text{C}$ e teor de dióxido de carbono de $5 \pm 0.1\%$). Após 60 dias foi medida a profundidade de carbonatação.

Tabela 2.13: Composições e resultados dos provetes de betão (NUNES *et al.*, 2013)

Mix number	Ref.	W_c (kg/m ³)	W_{GP} (kg/m ³)	W_w (kg/m ³)	W_{sp} (kg/m ³)	W_s (kg/m ³)	Dflow (mm)	Tfunnel (s)	f_c , 28 d (MPa)	Resistiv, 28 d (Ω m)	Carb (mm)
1	C1	497.4	276.9	244.5	9.68	1249.3	269.25	7.37	67.5	256.4	0.0
2	C2	497.4	276.9	244.5	9.68	1249.3	284.25	7.89	55.5	252.1	2.1
3	C3	497.4	276.9	244.5	9.68	1249.3	284.50	7.27	65.9	241.1	1.5
4	C4	497.4	276.9	244.5	9.68	1249.3	294.75	6.55	65.4	256.3	1.5
5	C5	497.4	276.9	244.5	9.68	1249.3	321.50	6.38	65.4	225.2	1.8
6	F1	529.7	288.7	229.0	9.82	1249.3	158.00	29.80	78.3	345.8	0.0
7	F2	595.9	168.0	258.7	9.17	1249.3	293.00	4.62	71.9	105.1	0.0
8	F3	417.1	375.5	229.3	9.51	1249.3	231.75	14.38	56.9	408.0	4.1
9	F4	469.2	265.6	259.0	8.82	1249.3	354.00	3.22	65.3	214.1	4.2
10	F5	529.7	288.7	228.4	10.64	1249.3	199.75	17.22	71.0	288.4	0.0
11	F6	595.9	168.0	258.1	9.93	1249.3	311.75	4.70	72.9	88.3	0.0
12	F7	417.1	375.5	228.6	10.30	1249.3	351.00	8.72	66.9	287.5	3.0
13	F8	469.2	265.6	258.4	9.55	1249.3	350.75	3.26	67.7	192.6	3.9
14	CC1	443.7	382.4	217.1	10.33	1249.3	178.00	31.33	76.7	504.4	0.3
15	CC2	542.3	188.6	267.4	9.14	1249.3	358.25	2.64	66.6	105.7	2.1
16	CC3	621.7	181.1	244.2	10.03	1249.3	253.75	9.05	77.9	125.5	0.0
17	CC4	414.5	340.8	244.7	9.44	1249.3	349.75	5.33	57.4	144.5	5.1
18	CC5	497.4	276.9	245.0	9.03	1249.3	284.00	7.54	53.7	201.9	2.6
19	CC6	497.4	276.9	244.0	10.33	1249.3	317.00	6.28	62.8	225.6	2.9

W_c , W_{GP} , W_{sp} , W_w , W_s represent the weight (by unit of mortar volume) of cement, glass powder, superplasticizer, free water and sand, respectively.

A carbonatação foi mais influenciada pela razão água/cimento do que pela substituição por pó de vidro e a carbonatação aumentou com a razão água/cimento.

Matos *et al.*, que seguiram o procedimento descrito em RILEM CPC-18, avaliaram a profundidade de carbonatação em provetes cilíndricos para cada tipo de betão autocompactável produzido, após uma exposição de 28 dias numa câmara de carbonatação a CO_2 . Após a serragem do mesmo, o processo de avaliação foi semelhantes aos descritos anteriormente, isto é, utilização de um marcador de fenolftaleína e medição da profundidade de carbonatação para cada provete.

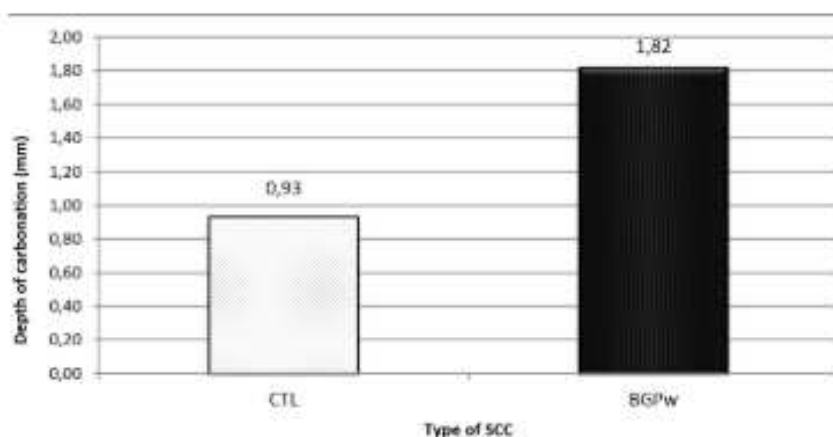


Figura 2.17: Profundidade de carbonatação (MATOS *et al.*, 2016)

A profundidade de carbonatação foi superior para o betão com resíduos de vidro, confirmando a tendência quando se trata de um material pozolânico (redução de CH).

2.3.8.RESISTÊNCIA AO ATAQUE DOS SULFATOS

O ião sulfato ataca apenas os aluminatos do cimento Portland endurecido ou cimento com clínquer Portland, formando sobretudo etringite (e algum gesso) que é uma reação muito expansiva se a água presente for suficiente (COUTINHO, 1998).

Se a reação for suficientemente expansiva, causa tensões internas e fissuração irregular do betão, o que pode contribuir para a penetração posterior de mais substâncias agressivas e posterior degradação.

A resistência ao ataque dos sulfatos foi avaliada de acordo com a norma portuguesa E-462, com leituras realizadas ao longo de 26 semanas.

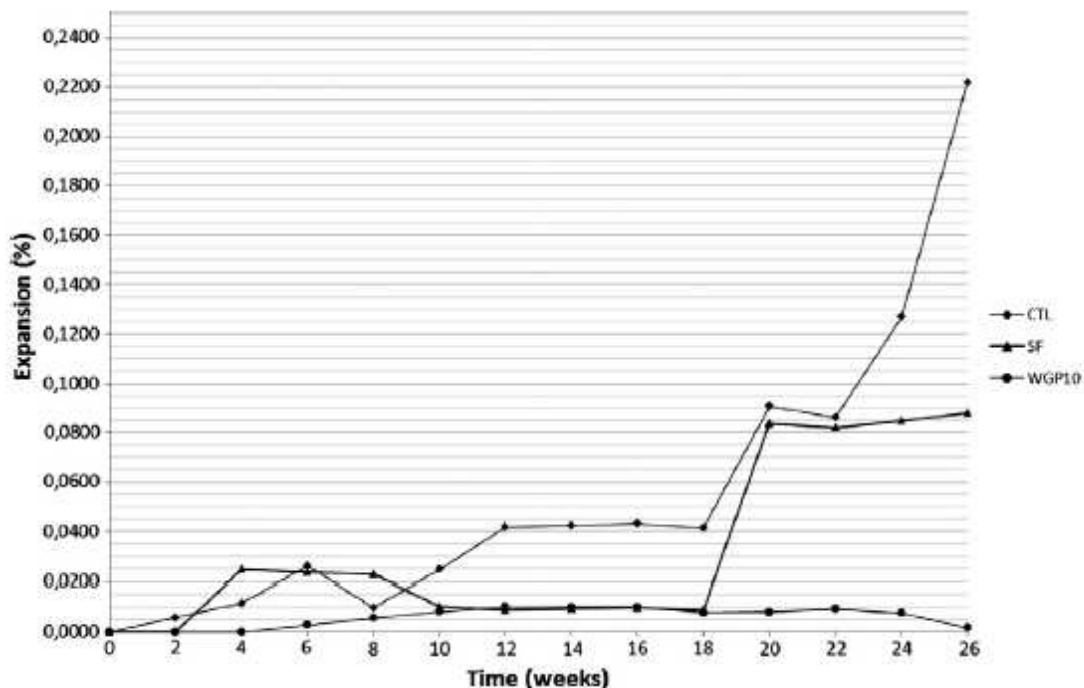


Figura 2.18: Expansão devido ao ataque por sulfatos ao longo de 26 semanas (MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012)

Os resultados demonstram uma resistência aos sulfatos impressionante quando as argamassas incorporam WGP, sendo até superior relativamente à substituição por SF. A atividade pozzolânica do pó de vidro e da sílica de fumo não permite que a portlandite reaja com os sulfatos, prevenindo a formação de etringite (MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012).

2.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C490 (2011) - Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM C1567 (2013) - Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). West Conshohocken: ASTM International.

APA - Relatório do Estado do Ambiente Portugal 2016. Agência Portuguesa do Ambiente. 2017.

CHEN, M. C. et al. - The influence of carbonation process on concrete bridges and durability in Estonian practice The influence of carbonation process on concrete bridges and durability in Estonian practice. 2017). doi: 10.1088/1757-899X/251/1/012072.

COUTINHO, J. - Betões eco-eficientes com resíduos. Porto: 1as Jornadas de Materiais na Construção. 2011.171–214.

COUTINHO, Joana Sousa - Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem. FEUP Edições.1988. ISBN 9727520731.

COUTINHO, Joana Sousa - Materiais de Construção 2 – Ligantes. Acessível na Faculdade de Engenharia – Atualizado em 2015.

KAMALI, Mahsa; GHahremaninezhad, Ali - An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders. Construction and Building Materials. . ISSN 09500618. 112:2016) 915–924. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.085.

KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET, B. - Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. Construction and Building Materials. . ISSN 09500618. 44:2013) 74– 80. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040.

NP EN 196-1 (2006) - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: determinação das resistências mecânicas. Lisboa: IPQ.

NP EN 196-3 (2005) - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: determinação do tempo de presa e da expansibilidade. IPQ.

NP EN 196-6 (2010) - Métodos de ensaio de cimentos Parte 6:Determinação da finura IPQ.

NP EN 197-1 (2012) - Cimento. Parte 1: composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. IPQ.

MATEUS, Ricardo - Construção Sustentável : O Novo Paradigma. 2011.

MATOS, Ana Mafalda - Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos

MATOS, Ana Mafalda - Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos. Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto. 2010.

MATOS, Ana Mafalda et al. - Durability Enhancement Of SCC With Waste Glass Powder. Materials Research. . ISSN 1516-1439. 19:1 (2016) 67–74. doi: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0288.

MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana - Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. Construction and Building Materials. . ISSN 09500618. 36:2012) 205–215. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027.

- MENDES, Amado et al. - As Empresas Vidreiras e o Desenvolvimento Regional em Portugal: da Autarcia (1870-1914) à internacionalização (1980-2000). *Stand.* 1892 (2008) 197–202.
- MERIDA, Ahcene; KHARCHI, Fattoum - Pozzolan Concrete Durability on Sulphate Attack. *Procedia Engineering*. . ISSN 18777058. 114:2015) 832–837. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.035.
- MOREIRA, Alberto Mário Vasconcelos Tavares - Patologia do Betão. Acessível na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.2016.
- NP 4220 (2015)-Pozolanas para betao argamassa e caldas: definições, requisitos e verificação da conformidade. Caparica:IPQ.
- NUNES, Sandra et al. - Mixture design of self-compacting glass mortar. *Cement and Concrete Composites*. . ISSN 09589465. 43:2013) 1–11. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.05.009.
- OMRAN, Ahmed F. et al. - Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications. *Construction and Building Materials*. . ISSN 09500618. 135:2017) 43–58. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.218.
- RAMOS, Telma; MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana - Strength and Durability of Mortar Using Cork Waste Ash as Cement Replacement. *Materials Research*. . ISSN 1516-1439. 17:4 (2014) 893–907. doi: 10.1590/S1516-14392014005000092.
- REHAN, R.; NEHDI, M. - Carbon dioxide emissions and climate change: Policy implications for the cement industry. *Environmental Science and Policy*. . ISSN 14629011. 8:2 (2005) 105–114. doi: 10.1016/j.envsci.2004.12.006.
- SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin - Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*. . ISSN 00088846. 34:1 (2004) 81–89. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00251-5.
- SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin - Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*. . ISSN 00088846. 36:3 (2006) 457–468. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.012.
- SILVA, ANTÓNIO; FERNANDES, ISABEL; CASTRO, Nélia - A Petrografia na Avaliação da Reactividade de Agregados para Betão. 2006) 57–72.
- SERPA, D. et al. - ASR of mortars containing glass. *Construction and Building Materials*. . ISSN 09500618. 47:2013) 489–495. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.058.
- TEODORO, Nuno Filipe Godinho - Contribuição para a Sustentabilidade na Construção Civil: Reciclagem e Reutilização de Materiais. 2011) 1–78.
- TAHA,Bashar,NOUNU,Ghassan.Usin lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR supressors.*Cement and Concrete Composites*.2008;30:497-505.
- YU, Cheng; SUN, Wei; SCRIVENER, Karen - Mechanism of expansion of mortars immersed in sodium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*. . ISSN 00088846. 43:1 (2013) 105–111. doi: 10.1016/j.cemconres.2012.10.001.

3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

De forma a avaliar a potencialidade do resíduo de vidro como substituto parcial do cimento, o programa experimental realizado, descrito ao longo deste capítulo, estuda pasta e argamassas que contém resíduos de vidro moído (GGPBA) e não moído (GPBA).

Após o processo de moagem, com e sem álcool, realizaram-se ensaios para determinar a massa volúmica dos diferentes materiais envolvidos e a superfície específica, seguindo-se a realização dos ensaios com as argamassas, utilizando os materiais seguintes:

- Cimento CEM I 42,5R cedido pela Secil;
- Areia normalizada CEN;
- Água destilada;
- Resíduos de vidro moído (GGPBA);
- Resíduos de vidro não moído (GPBA).

Os ensaios realizados sobre as argamassas foram os seguintes:

- Avaliação da trabalhabilidade (ASTM C230, 2013);
- Ensaio de resistências mecânicas à flexão e compressão (NP EN 196-1, 2006);
- Ensaio de determinação da resistência à carbonatação (E 391,1993);
- Ensaio de determinação da resistividade elétrica;
- Ensaio de penetração acelerada de cloretos (E463,2004);
- Ensaio de absorção de água por capilaridade (E393-1993 e RILEM TC 116-PCD,1999);
- Ensaio de resistência ao ataque por sulfatos (E462,2004);
- Ensaio acelerado em barra de argamassa- ASR (reação álcalis-sílica) (ASTM C-1260-14).

3.2. MATERIAIS

3.2.1. ÁGUA DESTILADA

Está definido na norma NP EN 196-1 (2006) que, para os ensaios de referência, deve-se utilizar água destilada ou desionizada. Durante todo o procedimento experimental utilizou-se água destilada, que se encontrava à temperatura ambiente do laboratório onde se produziram as argamassas.

3.2.2. AREIA NORMALIZADA CEN

A produção das argamassas realizou-se com uma areia normalizada CEN, de acordo a norma NP EN 196-1 (2006). Trata-se de uma areia natural, siliciosa com grãos arredondados, cujo teor em sílica é igual ou superior a 98%.

A areia vem embalada em sacos de plástico com um conteúdo de (1350 ± 5) g e deve satisfazer a composição granulométrica apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição granulometria Areia normalizada CEN

Abertura do peneiro (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Resíduos acumulados (%)	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

3.2.3. CIMENTO

Todos os ensaios realizados contaram com a utilização de um cimento CEM I 42,5R, de acordo com a norma NP EN 197-1 (2012), sendo constituído por uma percentagem de igual ou superior a 95% de clínquer e a restante percentagem por constituintes adicionais minoritários.

Na tabela seguinte encontram-se os resultados de um controlo estatístico fornecido pela SECIL em relação ao cimento utilizado no procedimento experimental. O controlo inclui uma análise química e ensaios mecânicos.

Tabela 3.2: Análise química e ensaios mecânicos do cimento fornecido pela SECIL

Análise química (%)	Ano		Mês	
	Perda ao fogo		2,28	
	Resíduo Insolúvel		1,03	
	Óxido de Silício		20,33	
	Óxido de alumínio		4,83	
	Óxido de ferro		3,02	
	Óxido de Cálcio		63,31	
	Óxido de Magnésio		1,91	

Ensaio Mecânicos (MPa)	Sulfatos	2,85	3,10
	Óxido de Potássio	0,73	0,75
	Óxido de Sódio	0,20	0,17
	Cloretos	0,05	0,05
	Cal livre	0,96	1,48
	Resistência à flexão aos 2 dias	5,6	6
	Resistência à flexão aos 7 dias	7,6	8,1
	Resistência à flexão aos 28 dias	8,7	8,9
	Resistência à compressão aos 2 dias	31,1	33,4
	Resistência à compressão aos 7 dias	47,5	46,8
	Resistência à compressão aos 28 dias	58,3	58,4

3.2.4. PÓ DE VIDRO

O material a ser usado como substituto parcial do cimento é oriundo da empresa BA Glass Portugal, S.A.. O resíduo de vidro, oriundo da reciclagem das garrafas produzidas pela empresa, resulta de uma série de operações de tratamento.

O casco não tratado é inserido nas tremonhas de entrada com a máquina de pá carregadora. Os materiais com tamanho superior a 10 milímetros são inseridos nas respetivas tremonhas e passam pelas operações seguintes, de forma sequencial. Os materiais com tamanho inferior a 10 milímetros são inseridos numa tremonha separada, seguindo diretamente para a fase de secagem. Um equipamento eletromagnético separa os contaminantes, seguindo-se a crivagem. Nesta fase, um crivo separa o casco em duas categorias: inferiores a 50 mm ou superiores a 50 mm. A fase seguinte, denominada por separação manual de contaminantes, destina-se ao tratamento do material da categoria “superior a 50 mm”, sendo removido manualmente contaminantes que possam interferir no processo de tratamento ou qualidade do produto. Sobre este material é efetuada uma britagem, para reduzir a sua granulometria para a categoria “inferior a 50mm”. Os materiais da operação anterior são misturados com os materiais de tamanho inferior a 10 mm da 1ª opção, seguindo-se um processo de secagem num equipamento automatizado, havendo um rascador que limpa as superfícies do vidro. Este mesmo material volta a passar por um crivo que separa as partículas finas (menores que 8 mm), encaminhando-as para um circuito de tratamento de casco fino, onde são submetidas a um processo de secagem e a um crivo automatizado que separa as partículas inferiores a 3 mm encaminhando-as para um moinho de rolos para obter ainda mais pequenas. As restantes passam por um equipamento eletromagnético para que se separem os contaminantes ferrosos e os contaminantes não ferrosos que são separados por correntes indutivas. Mais uma vez, o material passa por um crivo que separa as partículas em três gamas diferentes, fino,

intermédio e graúdo, havendo, de seguida, uma separação automática de contaminantes efetuada por um conjunto de três máquinas de inspeção ótica automatizadas para cada categoria de tamanho, reencaminhando as partículas para um circuito de separação. O passo seguinte é semelhante ao processo de separação anterior mas quando se trata das categorias de tamanho intermédio e graúdo a separação do casco de cor branca é feita reencaminhando-o para o circuito de purificação de casco branco, havendo nova crivagem automática para separar mediante a dimensão, uma nova separação automática para separar materiais metálicos e materiais com cor não branca. Ao casco verde e mistura âmbar são removidos manualmente os contaminantes que não foram separados nas operações anteriores.

Nota ainda para o facto de, durante todo este processo, ser feita uma aspiração automática de contaminantes leves como papéis e plásticos. O resíduo final, material fino de cor clara, apresenta-se na figura 3.1.



Figura 3.1: Resíduo de vidro GPBA

No laboratório foi necessário peneirar o resíduo com o peneiro 1 mm, sendo que a partir de 2,42 kg de material, ficou retido no peneiro 5,13 g de papel, plástico e fibras como se mostra na figura 3.2.



Figura 3.2: Plástico e fibras retidas no peneiro 1mm

O material passado foi utilizado como amostra para o programa experimental e designado por GPBA (glass powder, BA Glass). Apresenta-se na tabela 3.3 a composição química.

Tabela 3.3: Composição química GPBA

Elementos (%)	GPBA
SiO₂	60,91
Al₂O₃	2,54
Fe total (Fe₂O₃)	1,15
MnO	0,03
CaO	10,78
MgO	1,07
Na₂O	9,63
K₂O	0,92
TiO₂	0,15
P₂O₅	0,16
P.Rubro	12,27
SO₂	0,49
Cl	0,16

Os resultados da granulometria a laser realizados são apresentados na tabela 3.4 juntamente com o cimento utilizado durante o procedimento experimental.

Tabela 3.4: Granulometria do cimento e GPBA (μm)

Material	D(10)	D(50)	D(90)
CEM I 42,5R	1,42 $\pm$ 0,01	13,50 $\pm$ 0,08	40,52 $\pm$ 0,24
GPBA	4,45 $\pm$ 0,03	25,96 $\pm$ 0,26	127,00 $\pm$ 0,12

3.3. MOAGEM

Para que o resíduo de vidro possa ser utilizado como um potencial substituto do cimento é aconselhável que apresente uma finura semelhante ou superior à do cimento.

Assim, procedeu-se à moagem do pó de vidro (grosseiro) no moinho planetário PM100, seguindo alguns critérios de utilização:

- Utilizar apenas 1/3 do volume do almofariz (aproximadamente 150g);
- Manter uma velocidade de rotação entre 350 a 400 rpm.;
- Utilizar um contrapeso que equivale à soma do peso do almofariz com tampa, peso das bolas e o peso da amostra.



Figura 3.3: Moinho planetário PM 100

Inicialmente, optou-se por moer o resíduo de vidro em duas fases distintas. A primeira fase realizou-se de forma consecutiva com esferas de 20 mm durante 15 minutos e com 350 r.p.m. e a segunda fase realizou-se durante 10 minutos com esferas de 1 mm. Após a segunda fase, retiraram-se as esferas de 1 mm recorrendo a peneiração mecânica.



Figura 3.4: Peneiro com esferas de 1mm e com fibras

Retirou-se então uma amostra para nova análise granulométrica. A análise granulométrica e, mais tarde, os resultados da finura, que podem ser consultados no ponto 3.4.2. indicam que o material moído é mais grosseiro do que o original, o que contradiz o expectável. Concluiu-se então, após análise aprofundada, que na moagem as fibras terão criado novelos (figura 3.5) que interferiam com o método da análise granulométrica assim como no ensaio de Blaine.



Figura 3.5: Fibras visíveis na moagem seca

Tabela 3.5: Granulometria do cimento e do GPBA moído a seco (μm)

Material	D(10)	D(50)	D(90)
CEM I 42,5R	1,42 $\pm$ 0,01	13,50 $\pm$ 0,08	40,52 $\pm$ 0,24
GPBA moído a seco	4,57 $\pm$ 0,01	32,96 $\pm$ 0,13	197,00 $\pm$ 2,00

Assim, decidiu-se por uma nova fase mais radical neste processo de moagem. Optou-se por repetir a segunda fase mas desta vez com 100 ml de álcool adicionados à amostra. Apesar de se tratar de um método mais moroso devido ao processo de secagem, no Projeto PTDC/ECM/098117/2008, Adições provenientes de resíduos para betão estrutural sustentável, os investigadores já tinham utilizado o álcool para moer o resíduo de vidro obtendo bons resultados.

Após 15 minutos de moagem com álcool e com uma velocidade de 350 r.p.m, colocou-se a amostra a secar na estufa a 50° C durante cerca de 10 minutos e realizou-se novamente a peneiração mecânica da amostra para retirar as esferas.



Figura 3.6: GPBA com álcool e esferas de 1mm

Os resultados do ensaio de Blaine (tabela 3.8) confirmaram uma maior finura supondo-se que os novos terão ficado mais desfeitos.

Tabela 3.6: Granulometria do resíduo de vidro após as diferentes moagens (μm)

Material	D(10)	D(50)	D(90)
GPBA	4,45 ±0,03	25,96 ±0,26	127 ±0,12
GPBA moído a seco	4,57 ±0,01	32,96 ±0,13	197,00 ±2,00
GGPBA	2,92 ±0,02	18,34 ±0,20	82,83 ±2,14

De forma a confirmar a presença de fibras no material utilizado como substituto parcial do cimento recorreu-se à observação de diferentes amostras no microscópio eletrónico de varrimento ambiental, de alta resolução, com microanálise por raios X. As amostras de CEM I 42,5R, GPBA (sem moagem), GPBA moído a seco e GGPBA (moagem húmida) foram revestidas com um filme fino de Au/Pd por pulverização catódica, permitindo a observação com diferentes ampliações.

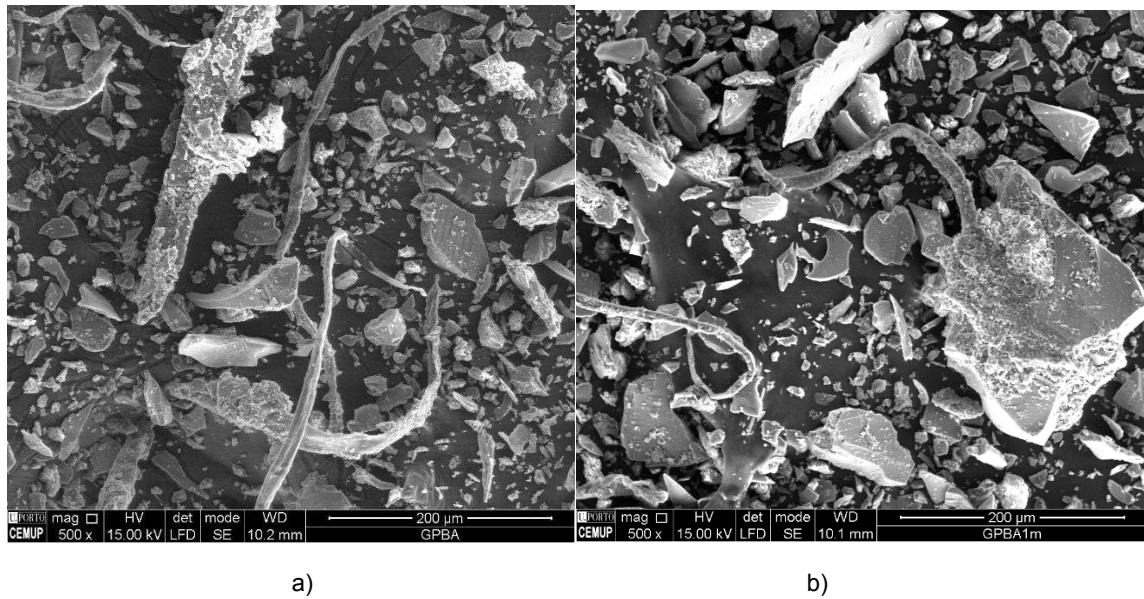


Figura 3.7: Amostra de GPBA (a) e GPBAmoído a seco (b)) observadas ao microscópio

A observação corroborou a teoria que, mesmo após a moagem, com álcool, o resíduo de vidro continha fibras que envolviam as partículas. A moagem com álcool permitiu reduzir algumas fibras mas a sua presença ainda é observável na figura 3.8.

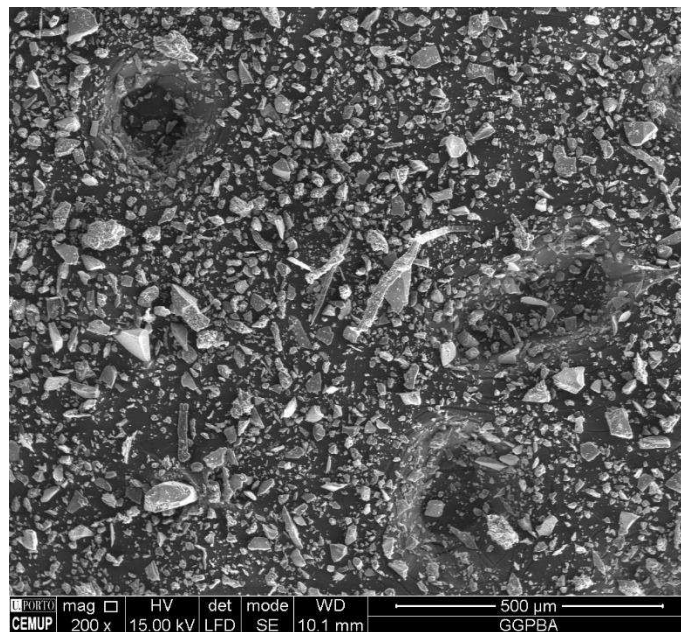


Figura 3.8: Amostra de GGPBA observada ao microscópio

3.4. ENSAIOS

3.4.1. MASSA VOLÚMICA

A determinação da massa volúmica permite calcular a composição de um betão, determinar a superfície específica de um cimento e verificar se um cimento está parcialmente hidratado.

A determinação da massa volúmica do CEM I 42,5 R e do resíduo de vidro foram determinadas seguindo as especificações do LNEC E-64 (1979) e de acordo com a norma NP EN 196-6 (2010). A massa volúmica é determinada pela maneira usual de qualquer sólido, conhecendo a massa e medindo o seu volume a partir do deslocamento um líquido num voluminímetro apropriado, incorretamente designado por densímetro, de Le Chatelier.



Figura 3.9: Voluminímetro com petróleo e material a estudar

Inicialmente, colocou-se o material numa estufa a temperatura de 110 °C até massa constante, sendo o arrefecimento efetuado num ambiente controlado. Segundo a norma, são utilizadas apenas 65g de cimento para realizar o ensaio, sendo que a massa a utilizar dos restantes produtos seria menor uma vez que a massa volúmica dos mesmos também é menor. No caso do GPBA utilizaram-se apenas 50g e no caso do GGPBA utilizaram-se 43 g. O líquido que se emprega é petróleo, que deve estar a uma temperatura de 20 ± 2 °C. Foi registada a primeira leitura (V_1).

De seguida, colocou-se, recorrendo a um funil e de forma muito cuidada, os materiais em estudo. Inclinou-se ligeiramente o voluminímetro e rodou-se num sentido e no outro para libertar as bolhas de ar aderentes às partículas. Registou-se a segunda leitura (V_2).

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

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

Sendo:

m a massa do provete seco (g)

V_1 o valor lido no voluminímetro contendo apenas petróleo (cm^3)

V_2 o valor lido no voluminímetro contendo petróleo e o provete (cm^3)

Tabela 3.7: Massa volúmica dos materiais a utilizar

Material	Massa (g)	V_1 (cm^3)	V_2 (cm^3)	M.V. (g/cm^3)
CEM I 42,5R	65	0,6	21,5	3,11
GPBA	50	0,1	22	2,28
GGPBA	43	0,6	19,5	2,28 ¹

¹ Tal como esperado, a massa volúmica de GPBA e GGPBA são iguais.

3.4.2. SUPERFÍCIE ESPECÍFICA

A partir do valor obtido para a massa volúmica foi possível quantificar o material necessário para realizar o ensaio de Blaine, que permite determinar a superfície específica de um material. Neste método, obriga-se um volume de ar a atravessar uma camada compactada do material com dimensões e porosidade específicas. Determina-se o tempo que leva o volume de ar a percorrer a camada, o que permite calcular o coeficiente de permeabilidade (COUTINHO, 1988).

O ensaio é realizado segundo a norma NP EN 196-6 e iniciou-se apenas após a medição da temperatura, que deve estar num intervalo de 20 ± 2 °C, e da humidade da sala, que deveria ser inferior a 65 %. Uma vez que a massa volúmica foi determinada anteriormente, foi possível calcular a massa do provete utilizada recorrendo à equação seguinte:

$$m = 0,5 \times \rho \times V \quad (3.2.)$$

Sendo:

m é a massa do provete (g)

ρ é a massa volúmica do cimento (g/cm^3)

V é o volume da camada de cimento (cm^3)

A massa da amostra foi recolhida, sendo agitada manualmente durante dois minutos e deixada em repouso durante mais dois minutos.

No fundo da célula que foi utilizada colocou-se um disco perfurado e sobre ele um novo filtro na horizontal. Introduziu-se a quantidade de cimento, m , de forma a evitar qualquer perda e, antes de se colocar um novo filtro, deram-se uma série de pancadas de forma a tornar a superfície do cimento plana. Introduziu-se um pistão até entrar em contacto com o papel de filtro e comprimiu-se para que a face inferior estivesse em contacto com a célula.



Figura 3.10: Equipamento utilizado no ensaio de Blaine

A célula foi colocada na abertura do tubo manométrico, garantindo-se a sua estanquidade com a colocação de massa lubrificante. A torneira foi aberta e com uma aspiração moderada, o líquido foi colocado ao nível de uma marca superior.

Após estabilização do nível do líquido, a torneira foi fechada e o líquido manométrico começa a escoar. O cronómetro foi colocado a funcionar quando o líquido ultrapassa a segunda marca, sendo parado quando atingiu a terceira marca. O tempo foi registado e repete-se o ensaio para a mesma camada.

O ensaio tem de ser repetido utilizando uma nova massa do mesmo provete e seguindo os passos enunciados anteriormente.

Os passos anteriores foram repetidos para o GPBA e para o GGPBA.

A superfície específica, S , pode ser expressa cm^2/g :

$$S = \frac{52,43 \times K \times \sqrt{t}}{\rho} \quad (3.3.)$$

Onde:

K é a constante do aparelho ($K=22,54$)

t é o tempo medido em segundos (s)

ρ é a massa volúmica do material em estudo (g/cm^3)

Os resultados encontram-se na tabela 3.8.

Tabela 3.8: Superfície específica dos diferentes materiais

Material	S (cm ² /g)
CEM I 42,5 R	3742
GPBA	3462
GPBA moído a seco	3131
GGPBA	4179

3.4.3. ENSAIOS COM ARGAMASSAS

3.4.3.1. Fabrico e composição dos provetes

A composição das argamassas utilizadas no fabrico dos provetes é feito de acordo com o traço 1:3:0,5. As quantidades de materiais utilizadas encontram-se na tabela seguinte.

Tabela 3.9: Composição das argamassas

Provetes	Água (g)	CEM I 42,5R (g)	Areia (g)	GPBA (g)	GGPBA (g)
CTL ₁	225	450	1350	0	0
CTL ₂	225	450	1350	0	0
10%GPBA	225	405	1350	45	0
10%GGPBA	225	405	1350	0	45

A amassadura foi realizada tendo como base a norma EN 196-1. O procedimento utilizado seguiu a figura 3.11. A norma indica ainda requisitos pré-definidos para o recipiente e pá a utilizar. É importante salientar que, antes de qualquer moldagem, os moldes foram devidamente oleados para facilitar a desmoldagem.

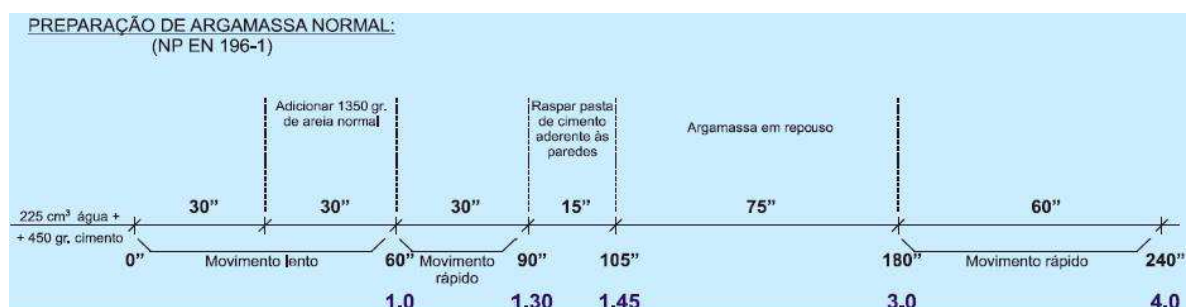


Figura 3.11: Procedimento de fabrico da argamassa (NP EN 196-1,2006)

Realizaram-se os ensaios de trabalhabilidade no final de cada amassadura, cujos resultados teriam de pertencer ao intervalo 213 ± 10 mm (definido no capítulo 3.4.3.2.).

Mediante os ensaios previamente definidos, a moldagem da argamassa e o tipo de compactação são adaptadas ao tipo de ensaio a realizar.

Para os ensaios da resistência ao ataque de sulfatos e penetração acelerada de cloretos, a argamassa final resultou da mistura de duas amassaduras produzidas separadamente. A primeira ficou coberta por um pano húmido enquanto se produzia a segunda. Colocaram-se as diferentes argamassas na misturadora, durante 30s com uma velocidade lenta, para tornar o material o mais homogêneo possível. É importante salientar que, de forma a economizar o material a ser utilizado, os provetes utilizados para testar a resistência mecânica aos 84 dias foram moldados com redes de inox para realizar o ensaio de resistividade.

A tabela seguinte especifica o tipo de provete utilizado, as suas dimensões e o tipo de compactação.

Tabela 3.10: Provetes a utilizar e respetiva compactação

Ensaio	Tipo de provete	Dimensões do provete	Compactação
Resistências mecânicas	Prismático	4x4x16cm	Mecânica
Carbonatação	Prismático	4x4x16cm	Mecânica
Penetração de cloretos	Cilíndrico	Diâmetro-10cm Altura- 5cm	Mesa vibratória durante 30 segundos
Absorção de água por capilaridade	Cilíndrico	Diâmetro-10cm Altura- 5cm	Mesa vibratória durante 30 segundos
Resistência ao ataque por Sulfatos	Prismático	2,5x2,5x16cm	Manual
Reação Álcali-silica	Prismático	2,5x2,5x25cm	Manual
Resistividade	Prismático	4x4x16 cm	Mecânica

3.4.3.2. Avaliação da trabalhabilidade

A trabalhabilidade, característica fundamental do betão fresco, consiste na maior ou menor facilidade com que o betão é amassado, transportado, compactado e colocado, e consiste na menor ou maior facilidade de segregação durante as operações referidas anteriormente (COUTINHO, 2015).

A avaliação da trabalhabilidade, que segue a norma ASTM C1437-5 (2015), é realizada na mesa de espalhamento com o respetivo molde cónico, devidamente humidificados.

Após a humedificação e amassadura, colocou-se a argamassa no molde tronco-cônico, devidamente centrado, em duas camadas, cada uma compactada com 10 pancadas. Retirou-se o molde e provocou-se a compactação por queda da mesa (25 em 15 segundos). Finalmente, mediram-se 4 diâmetros e calculou-se a média destes valores.



Figura 3.12: Medição dos diâmetros de espalhamento

Para controlar de forma rigorosa e avaliar a trabalhabilidade da argamassa, seguiu-se o processo descrito anteriormente ao produzir argamassas de controlo (CTL₁ e CTL₂), utilizadas para calcular a resistência mecânica aos 54 e 84 dias. Da medição dos diâmetros obtidos na mesa de espalhamento, calculou-se a média para a argamassa destinada a cada uma das idades.

Para realizar o controlo da trabalhabilidade das diferentes argamassas a serem produzidas, o intervalo de controlo definido resultou da média entre os valores da trabalhabilidade aos 84 e 56 dias, ou seja, 213 ± 10 mm, como está demonstrado na tabela 3.11.

Tabela 3.11: Intervalo de trabalhabilidade

Argamassas	Média	Média
	84 dias (mm)	56 dias (mm)
CTL ₁	215 $\pm$ 3	216 $\pm$ 0
CTL ₂	209 $\pm$ 1	212 $\pm$ 2
Intervalo de controlo	213 $\pm$ 10	

3.4.3.3. Massa Volúmica

Previamente à realização do ensaio de resistência mecânica, os provetes colocados na câmara húmida do LEMC até à data de realização do ensaio, foram limpos de forma a remover o excesso de água e pesados.

Tabela 3.12: Pesagens obtidas antes da realização do ensaio de resistência mecânica (g)

Argamassas	7 dias	σ	28 dias	σ	56 dias	σ	84 dias	σ
CTL₁	596,6	0,5	597,3	0,8	592,9	1,6	596,4	1,5
CTL₂	597,2	0,6	594,5	0,2	599,5	0,6	599,9	0,8
10%GPBA	519,8	0,9	523,0	1,5	521,0	0,5	529,0	1,1
10%GGPBA	496,2	2,0	505,0	3,5	511,2	2,2	514,3	2,9

O contraste de valores apresentados durante a pesagem é significativo, sendo facilmente verificado na tabela anterior que a presença de fibras interferia no desenvolvimento da reação pozolânica. Aliado a isto, o cálculo da massa volúmica dos provetes a serem utilizados no ensaio de resistência mecânica, cujos valores são apresentados na tabela 3.13, confirmam o efeito nefasto das fibras.

Tabela 3.13: Massas volúmicas (g/cm³)

Argamassas	7 dias	28 dias	56 dias	84 dias
CTL	2,33	2,33	2,32	2,33
10%GPBA	2,03	2,04	2,04	2,07
10%GGPBA	1,94	1,97	1,99	2,01

3.4.3.4. Resistências Mecânicas

O ensaio de resistência mecânica assume uma importância particular na caracterização do material do ponto de vista estrutural. Assim, a norma NP EN 197-1 (2012) fixa os valores mínimos para cimentos correntes.

Tabela 3.14: Requisitos mecânicos e físicos expressos como valores característicos (NP EN 197-1,2012)

Classe de resistência	Resistência à compressão (MPa)				Tempo de início de presa (min)	Expansibilidade (mm)
	Resistência inicial		Resistência de referência			
	aos 2 d	aos 7 d	aos 28 d			
32,5 L ^{a)}	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 L ^{a)}	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 L ^{a)}	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	-				
52,5 R	≥ 30,0	-				

^{a)} Classe de resistência definida apenas para os cimentos CEM III.

A avaliação da resistência mecânica de um cimento foi realizada de acordo com a norma NP EN 196-1 (2006) para as idades de 7, 28, 56 e 84 dias e para as diferentes composições definidas ponto 3.4.2.1.. Os provetes, após a desmoldagem, foram colocados dentro de água na câmara húmida do LEMC até à data de realização do ensaio. Depois de retirados do seu meio de preservação, removeu-se o excesso de água dos provetes e procedeu-se à pesagem dos mesmos, que foram inicialmente ensaiados à flexão. Desse mesmo ensaio, resultaram dois meios prismas de cada provete prismático utilizados para ensaiar a resistência à compressão.

3.4.3.4.1 Resistência à flexão

O ensaio foi realizado recorrendo a um equipamento normalizado, onde se aplica uma carga a meio vão, que aumenta uniformemente à velocidade de 50 ± 10 N/s até à rotura.

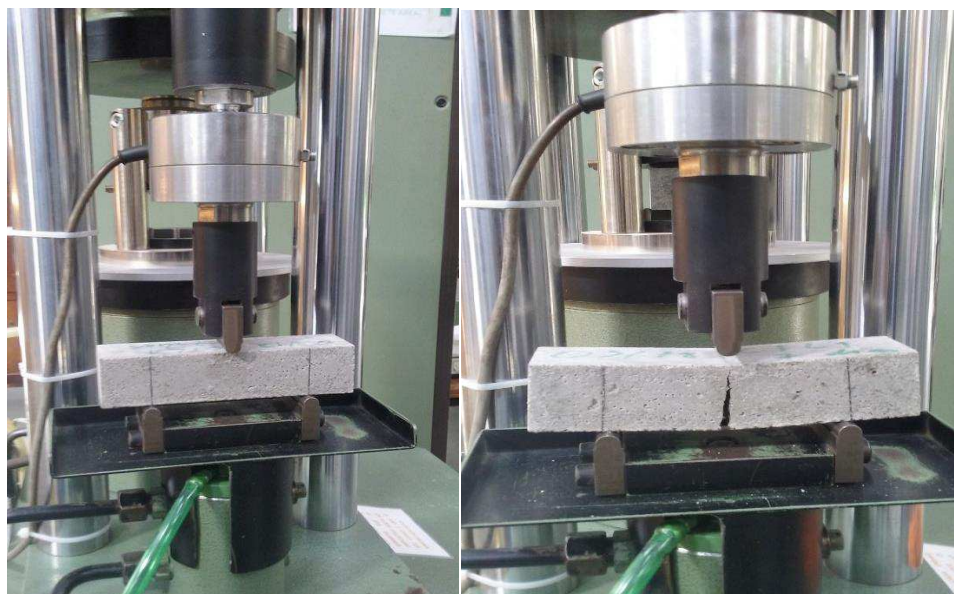


Figura 3.13: Ensaio de resistência à flexão

Os semi-prismas resultantes, utilizados posteriormente para o ensaio à compressão, permanecem cobertos por um pano húmido.

A resistência, em megapascal, é calculada a partir da fórmula:

$$Rf = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (3.4.)$$

Onde:

Rf é a resistência à flexão (MPa);

b é o lado da secção quadrada do prisma (mm);

F_f é a carga aplicada ao centro do prisma na rotura (N);

l é a distância entre apoios (mm).



Figura 3.14: Semi-prisma resultante do ensaio

Os resultados são apresentados na tabela 3.15.

Tabela 3.15: Resultados da resistência à flexão para as diferentes idades (MPa)

Argamassas	7dias	σ	28dias	σ	56dias	σ	84dias	σ
CTL ₁	6,6	0,0	7,8	0,2	7,7	0,1	8,0	0,3
CTL ₂	6,7	0,3	7,5	0,1	8,0	0,1	7,9	0,3
10%GPBA	3,9	0,1	4,3	0,2	4,7	0,1	4,8	0,2
10%GGPBA	3,4	0,1	3,8	0,1	4,3	0,1	4,5	0,2

3.4.3.4.2 Resistência à compressão

Cada meio prisma resultante do ensaio à flexão foi submetido, numa prensa de acordo com a norma, ao ensaio à compressão. Os provetes foram devidamente centrados e a carga aplicada de uma forma gradual a um ritmo de 2400 ± 200 N/s até à rotura.



Figura 3.15: Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão resulta da fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{40 \times 40} \quad (3.5.)$$

Sendo:

R_c é a resistência à compressão (MPa);

F_c é a carga máxima na rotura (N);

Os valores da resistência são apresentados na tabela 3.16.

Tabela 3.16: Resultados da resistência à compressão para as diferentes idades (MPa)

Argamassas	7dias	σ	28dias	σ	56dias	σ	84dias	σ
CTL ₁	47,5	0,7	58,1	1,2	64,5	0,7	64,0	1,1
CTL ₂	48,3	0,5	58,0	0,9	63,4	1,3	67,0	0,9
10%GPBA	20,4	0,4	25,0	0,5	26,4	0,6	28,1	0,7
10%GGPBA	17,0	0,9	20,4	1,0	23,8	0,4	25,8	0,5

3.4.3.5. Resistividade Elétrica

A resistividade, característica intrínseca do material, relaciona a capacidade do betão transportar uma corrente elétrica através dos poros do betão e depende da temperatura, humidade e processo de hidratação (NUNES *et al.*, 2013).

Trata-se de um ensaio não-destrutivo e, de forma a economizar recursos, a resistividade medida aos 7, 28, 56 e 84 dias foi feita utilizando os provetes utilizados no ensaio de resistência mecânica aos 84 dias. Nestes mesmos provetes foram inseridas redes de inox nas extremidades. A humidade deve manter-se constante durante o ensaio para que não exista influência nos resultados (provetes devem estar completamente saturados). Dois elétrodos são colocados nas extremidades do provete, fazendo-se passar uma corrente elétrica e medindo a diferença de potencial.



Figura 3.16: Provetes com redes de inox

O valor da resistividade permite, se as condições de temperatura e humidade forem iguais, comparar a estrutura porosa das amostras. Assim, quanto maior o valor da resistividade, maior oposição à passagem da corrente elétrica, a rede porosa será menos profusa e os poros mais estreitos.

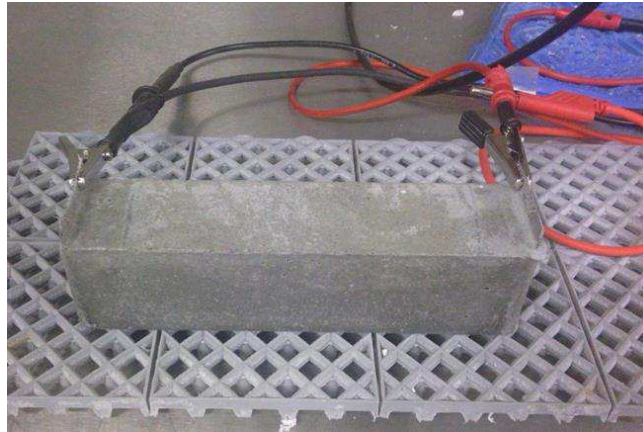


Figura 3.17: Ensaio de resistividade elétrica

A resistividade é obtida aplicando a lei de Ohm, apresentada na equação seguinte:

$$R = \frac{V}{I} \leftrightarrow R = \rho \times \left(\frac{L}{A}\right) \leftrightarrow \rho = \frac{V \times A}{L \times I} \quad (3.6.)$$

Onde:

R é a resistência elétrica (Ω)

V é a diferença de potencial (V)

I é a intensidade da corrente (A)

L é o comprimento do provete (m)

A é a área do eléctrodo em contacto com o provete (m^2)

Os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 3.17: Resultados da resistividade elétrica para as diferentes idades ($k\Omega \cdot cm$)

	7d		28d		56d		84d	
Idade (dias)	ρ médio($k\Omega \cdot cm$)	σ	ρ médio($k\Omega \cdot cm$)	σ	ρ médio($k\Omega \cdot cm$)	σ	ρ médio($k\Omega \cdot cm$)	σ
CTL ₁	3,29	0,00	4,18	0,08	4,60	0,07	4,64	0,06
CTL ₂	3,36	0,06	4,20	0,10	4,57	0,11	4,63	0,11
10%GPBA	3,45	0,06	4,96	0,09	5,97	0,08	6,52	0,06
10%GGPBA	3,27	0,02	4,71	0,02	5,75	0,07	6,29	0,06

A figura seguinte permite perceber a evolução da resistividade elétrica das diferentes composições nas idades pré-definidas.

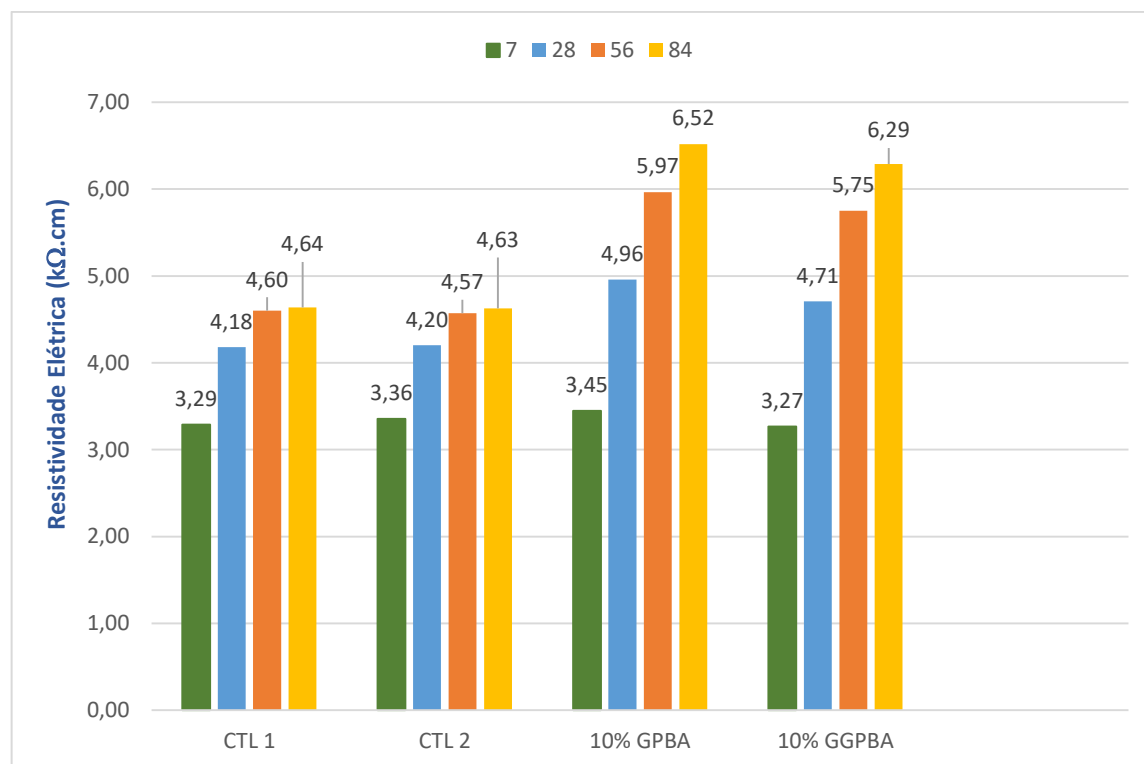


Figura 3.18: Evolução da resistividade elétrica

3.4.3.6. Carbonatação acelerada

A carbonatação do betão é considerada como uma reação química inevitável. Corresponde à reação entre compostos cálcicos do betão como hidróxido de cálcio (resultam da hidratação do cimento) com o dióxido de carbono (CO_2). Durante a última década, o aumento de CO_2 na atmosfera é de cerca de 10% e de acordo com os mais recentes estudos é expectável que esta percentagem aumente. Durante o processo de carbonatação, o valor do pH baixa de 12,5 para um valor igual ou inferior a 9 (CHEN *et al.*, 2017).

A carbonatação varia na razão direta da permeabilidade do betão (quantidade de poros) e no caso dos poros se encontrarem saturados a carbonatação não se verifica (COUTINHO, 1988).

À medida que a carbonatação avança, há substituição de hidróxido de cálcio por carbonato de cálcio, diminuindo a porosidade do betão superficial (MOREIRA, 2016).

Se a carbonatação progredir e atingir o betão envolvente das armaduras, a película que envolve as armaduras é despassivada, permitindo a corrosão das armaduras.

A determinação da resistência à carbonatação seguiu, em geral, o procedimento descrito na Especificação LNEC E 391 (1993).

O ensaio foi realizado em provetes de argamassa com dimensões de 4x4x16 cm que, após cura de 5 semanas na câmara húmida, foram colocados na câmara de fluência com uma humidade relativa de 50% e 20 ± 2 °C durante 14 dias. Depois deste período, os provetes foram introduzidos na câmara de carbonatação com uma humidade relativa de 55 a 65%, à temperatura de 23 ± 3 °C e uma alimentação de ar com $5 \pm 0,1\%$ de CO_2 , onde permaneceram durante 5 semanas.



Figura 3.19: Provetes utilizados no ensaio de carbonatação acelerada

Após esse período, procedeu-se ao corte do provete de 4 cm de espessura a partir do topo dos mesmos. A seção retangular era pulverizada com uma solução de fenolftaleína. Nas zonas não carbonatadas, com pH elevado, a seção apresentou uma cor rosa ou vermelho-púrpura e nas zonas carbonatas, com pH mais baixo, a seção pulverizada manteve-se incolor.



Figura 3.20: Provetes pulverizados por fenolftaleína

Posteriormente, recorrendo a um paquímetro, procedeu-se à medição de 3 leituras por face da profundidade de carbonatação, obtendo os valores representados na tabela 3.18.

Tabela 3.18: Resultados da profundidade de carbonatação (mm)

Argamassas	Média (mm)	σ
CTL ₁	3,66	1,86
CTL ₂	3,58	1,81
10%GPBA	9,30	1,65
10%GGPBA	11,30	1,62

A análise da tabela anterior e da figura 3.21 demonstram bem o contraste entre os valores obtidos pelos provetes de controlo e os provetes contendo resíduo de vidro.

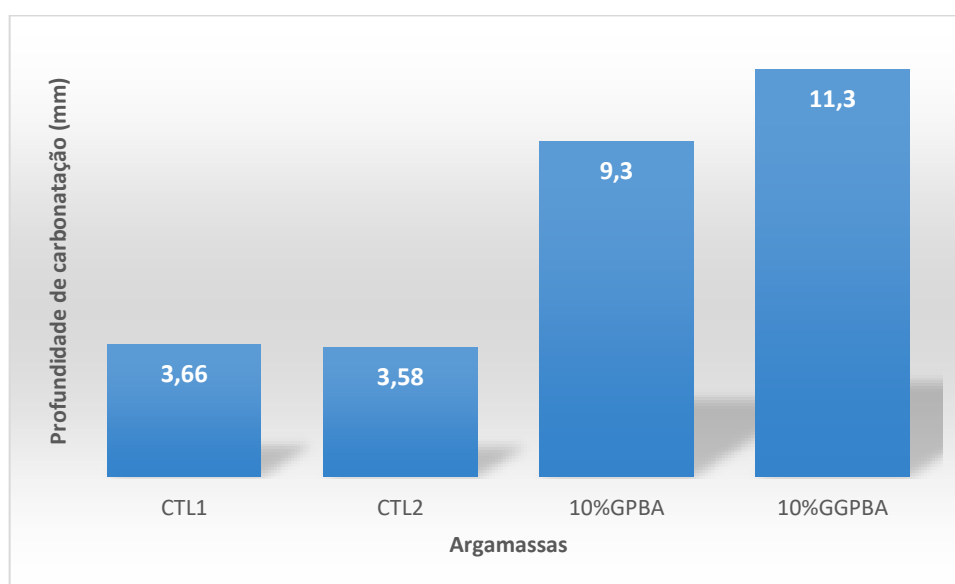


Figura 3.21: Profundidade de carbonatação

3.4.3.7. Absorção por Capilaridade

A absorção de água por capilaridade, a par da difusão e da permeabilidade, é um dos principais mecanismos de transporte de fluidos no betão. A penetração de fluidos no betão resulta quase sempre de uma combinação entre estes mecanismos (MOREIRA,2016).

A água, componente essencial em todas as reações que podem de alguma maneira pôr em causa a durabilidade do betão, funciona como meio de transporte de agentes agressivos. O fenómeno de absorção é definido 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.

Para avaliar a influência do resíduo de pó de vidro como substituto parcial do cimento na durabilidade do betão realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade, baseado genericamente na Especificação LNEC E 393, evoluindo a forma e dimensão dos provetes de forma a facilitar uma comparação posterior.

Os provetes cilíndricos produzidos com sensivelmente 10 cm de diâmetro e altura de 5 cm, após a desmoldagem, foram colocados na câmara húmida, totalmente submersos, durante 8 semanas. No final deste período, os provetes foram colocadas numa estufa a 40 ° C até massa constante, durante 2 semanas, sendo, posteriormente, colocados na sala onde se realizou o ensaio. Permaneceram durante 24h para que a temperatura estabilizasse.



Figura 3.22: Provetes cilíndricos

O equipamento, provido de reservatório e de um conta-gotas, mantém o nível da água constante. Os provetes, previamente pesados, foram colocados no equipamento, correspondendo esta primeira leitura à medição M_0 .



Figura 3.23: Equipamento utilizado para realizar o ensaio

Durante 24 horas, os provetes foram pesados (M_i) em intervalos de tempo crescentes. Para registar o peso dos provetes, estes eram retirados da água e secos superficialmente com um pano húmido.

A especificação LNEC E 393 define o parâmetro da absorção por capilaridade no tempo t_i como a razão entre o aumento de massa $M_i - M_0$ pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água.

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 reta obtida por regressão linear da curva de absorção nas primeiras horas (COUTINHO, 1998):

$$A = a_0 + S \cdot t^{0.5} \quad (3.7.)$$

Onde:

A é absorção de água por unidade da superfície do betão (mg/mm^2);

S é o coeficiente de absorção do material ($\text{mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$);

t é o tempo passado desde o instante inicial (min);

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

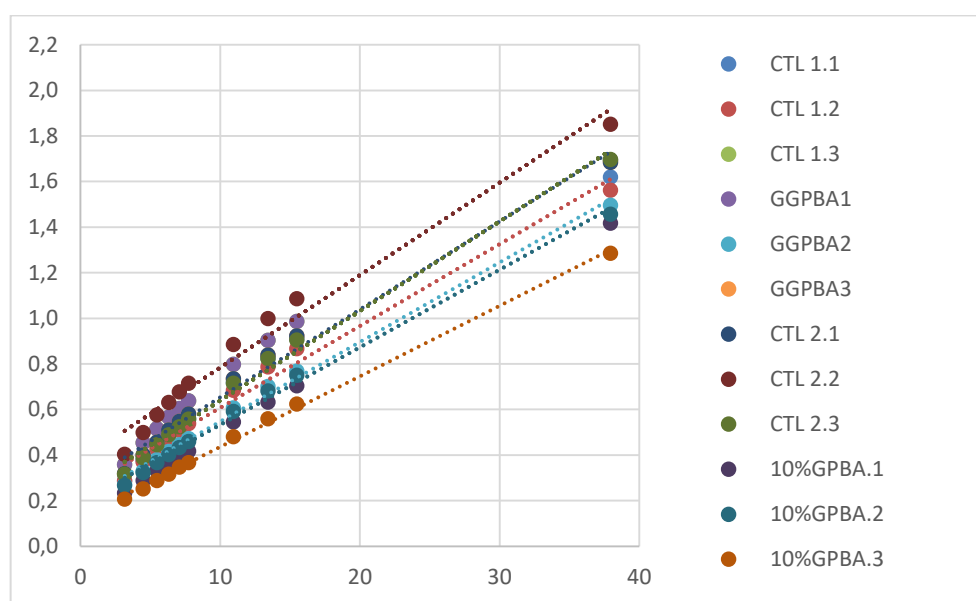


Figura 3.24: Curvas de absorção capilar

Tabela 3.19: Coeficiente de absorção dos diferentes materiais

Argamassas	$S \text{ (mg/mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$	σ
CTL₁	0,0488	0,0024
CTL₂	0,0502	0,0038
10%GPBA	0,0372	0,0028
10%GGPBA	0,0436	0,0076

A classificação do betão é realizada de acordo com a tabela 3.20, mas como se trata de argamassas é expectável que os valores limites sejam mais elevados, uma vez que o agregado grosso presente no betão complicaria o percurso da água através da rede porosa (COUTINHO, 2007).

Tabela 3.20: Limites do coeficiente de absorção no betão

Qualidade do betão	Coeficiente de absorção (mg/mm ² .min ^{0.5})
Baixa	$S > 0,2$
Média	$0,1 < S < 0,2$
Elevada	$S < 0,1$

3.4.3.8. Resistência à penetração de cloretos

A corrosão do aço do betão armado e pré-esforçado é uma das causas mais importantes de degradação de estruturas de betão.

A presença de cloretos, cuja facilidade de acesso às armaduras é determinada sobretudo pela permeabilidade da camada de recobrimento, provocam uma dissolução localizada da película passiva se a concentração junto da mesma for superior à concentração do teor crítico em cloretos e, caso as condições de humidade e oxigénio o permitam, iniciar a corrosão das armaduras.

Os cloretos podem estar presentes nos componentes do betão, daí a limitação do seu teor na normalização de diferentes países, ou provém do exterior, por exemplo, de ambientes marítimos ou saís de degelo (MOREIRA, 2016).

O transporte dos cloretos ocorre apenas em meio líquido e a entrada ocorre através dos poros capilares da pasta de cimento e das fendas existentes.

A determinação da resistência à penetração de cloretos seguiu a Especificação do LNEC E463 (2004), obtendo-se o coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário.

A tabela seguinte diz respeito à classificação da classe de resistência do betão aos 28 dias.

Tabela 3.21: Classificação de resistência do betão

Coeficiente de Difusão em betão	Resistência à penetração de cloretos
>15	Baixa
10-15	Moderada
5-10	Alta
2,5-5	Muito alta
<2,5	Extremamente alta

Para cada argamassa foram produzidos 3 provetes conforme a descrição apresentada anteriormente. Os provetes, após vibração durante 30s na mesa vibratória, foram colocados em água durante 2 meses na câmara húmida. Após esse período, os provetes foram retirados da câmara e transferidos para a câmara de vácuo durante 3 horas com uma pressão entre 1 a 5 kPa. Com a bomba de vácuo em funcionamento, foi adicionada uma solução saturada de hidróxido de cálcio para que os provetes ficassem totalmente imersos. A bomba foi desligada e os provetes ficaram na solução durante 18 ± 2 horas.



Figura 3.25: Provetes na câmara de vácuo

Na fase seguinte montaram-se os provetes em células de difusão, com a face moldada do provete em contacto com a solução de 10% de cloreto de sódio e a outra face em contacto com uma solução de hidróxido de sódio, e aplicou-se um potencial elétrico para forçar o transporte de iões de cloreto para o interior dos provetes.

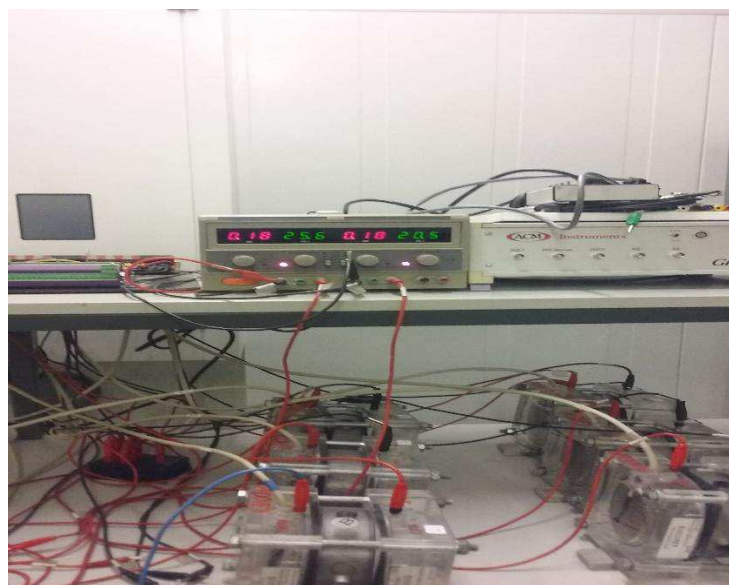


Figura 3.26: Provetes sujeitos a um potencial elétrico

A voltagem aplicada e o tempo de ensaio foram definidos de acordo com a tabela 3.22, após a medição inicial da intensidade da corrente para aplicação de uma voltagem de 30 volts.

Tabela 3.22: Diferença de potencial elétrico e duração do ensaio de migração (E463,2004)

Initial current I_{30V} (with 30 V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Após este processo, os provetes foram abertos axialmente por compressão linear e pulverizou-se com uma solução de nitrato de prata as superfícies retangulares para medir e visualizar as profundidades de penetração dos cloretos.

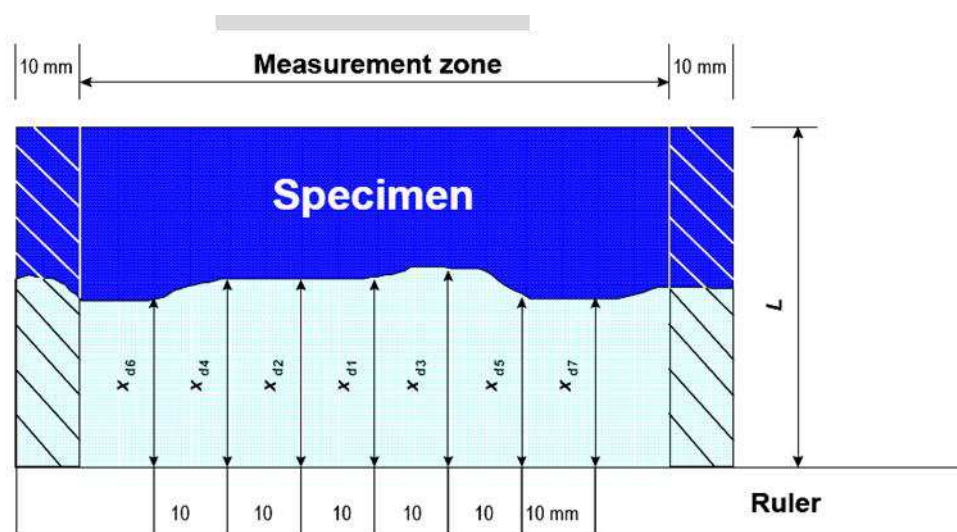


Figura 3.27: Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos

Quando o precipitado branco do cloreto de prata se tornou visível, mediu-se a profundidade de penetração de 10 em 10 mm, desde o centro até aos bordos, até se obter sete medições.



Figura 3.28: Medição da profundidade de penetração de cloretos

Tabela 3.23: Profundidade de penetração de cloretos

Argamassa	Provete	x_d	x_d médio	σ
CTL ₁	1	16,85	16,83	0,26
	2	16,5		
	3	17,14		
CTL ₂	1	20,07	22,07	1,69
	2	21,93		
	3	24,21		
10%GPBA	1	25,43	25,23	0,83
	2	24,14		
	3	26,14		
10%GGPBA	1	22,14	20,85	0,99
	2	19,71		
	3	20,71		

O coeficiente de difusão em regime estacionário é calculado a partir da equação:

$$D = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \times (x_d - 0,0238) \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \quad (3.8.)$$

sendo:

D , o coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12}$ (m²/s);

U , o valor absoluto da voltagem aplicada (V);

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

L , a espessura do provete (mm);

x_d , o valor médio da profundidade de penetração (mm);

t , a duração do ensaio, em horas.

A tabela 3.24 apresenta os resultados obtidos para as diferentes argamassas.

Tabela 3.24: Coeficiente de difusão dos cloretos

Argamassa	xd médio (cm)	U médio (V)	D_{ns} ,médio (10^{-12} m ² /s)	σ
CTL₁	16,83	19,89	13,81	0,01
CTL₂	22,07	25,27	14,26	0,01
10% GPBA	25,23	25,36	15,98	0,01
10% GGPBA	20,85	25,00	13,50	0,01

3.4.3.9. Resistência ao ataque por sulfatos

O ataque dos sulfatos ao betão resulta da reação química dos iões sulfatos com os aluminatos do betão sobretudo com a pasta endurecida de cimento, que na presença de água origina um sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringite) e sulfato de cálcio (gesso). Este tipo de ataque levou ao desenvolvimento de cimentos resistentes aos sulfatos caracterizados por quantidades pequenas de aluminato tricálcico (C₃A) (YU, SUN e SCRIVENER, 2013).

A formação de etringite é uma reação extremamente expansiva, que progride da superfície exterior para o núcleo do elemento. A fendilhação irregular facilita a penetração de novos agentes agressivos e acelera o processo de deterioração. Este processo pode levar à perda de resistência do betão acompanhado por desagregação em massa do mesmo (MERIDA e KHARCHI, 2015).

A origem dos sulfatos é mais uma variável a ter em conta. A origem interna ou externa pode ser colmatada, respetivamente, limitando o teor de sulfatos na água da amassadura e do conjunto dos constituintes do betão e utilizando cimentos com elevadas resistências aos sulfatos. Os fatores que mais influenciam a expansão verificada na prática são (MOREIRA, 2016):

- Condições de exposição, isto é, a severidade do ataque depende da quantidade de substância agressiva, neste caso, sulfatos;
- Acessibilidade, ou seja, a “permeabilidade” do betão;
- Suscetibilidade do betão, ou seja, a quantidade de substância reativa (depende do tipo de cimento);
- Quantidade de água disponível.

Os ensaios foram realizados de acordo com a especificação LNEC E-462 (2004), onde se descreve a determinação da expansão de seis provetes de 2,5x2,5x16 cm. Nas extremidades desses mesmos provetes foram colocados pernos para efetuar as leituras dos comprimentos de duas em duas semanas até perfazer um total de 26 semanas.

Após desmoldagem e identificação dos provetes, estes foram colocados numa solução previamente preparada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Pesaram-se 74,1 g de Ca(OH)_2 e dissolveram-se em 1000 ml de água, onde se colocaram os provetes submersos durante 28 dias.



Figura 3.29: Solução de sulfato de sódio

No final desses 28 dias e antes da leitura zero, foi necessário introduzir a barra invar no aparelho de medição para comparar a leitura em duas posições invertidas (calibração). Os provetes foram retirados da solução, foram limpos com um pano húmido com especial atenção para a zona dos pernos e procedeu-se à leitura zero. As quatro faces do provete foram medidas na sua posição normal, previamente indicada, e na posição invertida, sendo que o cálculo da expansão corresponde à média dos 8 valores medidos para cada provete. Terminadas as medições, os provetes foram imediatamente colocados de forma alternada em soluções diferentes. Os provetes 1,3 e 5 foram mantidos numa solução de hidróxido de cálcio, enquanto os provetes 2,4 e 6 foram colocados numa nova solução de sulfato de sódio (23,67g de Na_2SO_4 foram dissolvidas em 1000 ml de água).



Figura 3.30: Medição da expansão do provete

O aumento da extensão dos provetes é calculada a partir das equações seguintes:

$$EXP^{Ca(OH)_2}(x) = \frac{Lx - Lo}{1600} \quad (3.9.)$$

$$EXP^{SO_4Na_2}(x) = \frac{Lx - Lo}{1600} \quad (3.10.)$$

$$EXP^{Ca(OH)_2}(x) = \frac{EXP(1) + EXP(3) + EXP(5)}{3} \quad (3.11.)$$

$$EXP^{SO_4Na_2}(x) = \frac{EXP(2) + EXP(4) + EXP(6)}{3} \quad (3.12.)$$

A expansão resulta da diferença entre os provetes submersos na solução de sulfato de sódio e os provetes submersos na solução de hidróxido de cálcio:

$$Expansão (X) = EXP^{SO_4Na_2} - EXP^{Ca(OH)_2} \quad (3.13.)$$

Na tabela seguinte encontram-se os resultados da expansão obtida em cada semana para as argamassas estudadas.

Tabela 3.25: Expansão provocada pelo ataque por sulfatos (10 semanas)

Semana	CTL ₁	CTL ₂	10%GPBA	10%GGPBA
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,002	-0,004	-0,005	0,008
4	0,008	0,006	0,004	0,013
6	0,009	0,012	-0,006	0,014
8	0,010	0,016	0,006	0,014
10	0,015	0,013	0,007	0,016

A evolução da expansão provocada pelo ataque por sulfatos, expressa a partir da figura 3.30, não pode, no caso de um cimento e segundo a Especificação LNEC E 462, ao final de 26 semanas de imersão não pode ser superior a 0,1%. No entanto, o número reduzido de leituras (apenas 10 semanas) não permite tirar nenhuma conclusão.

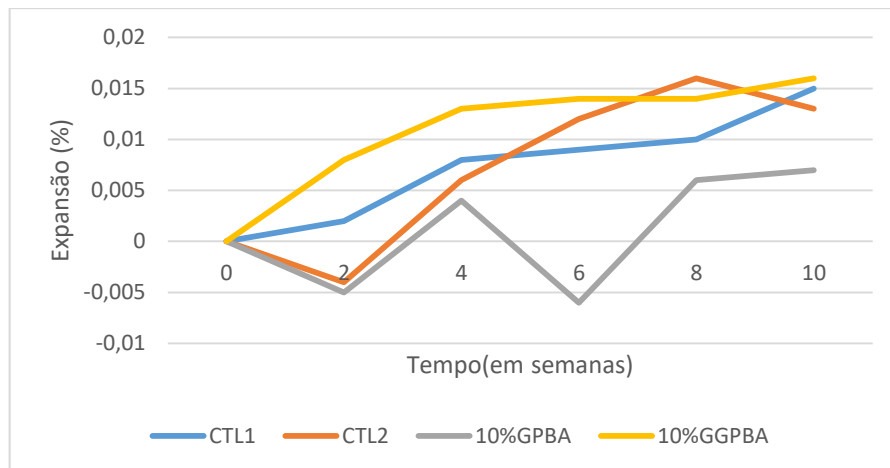


Figura 3.31: Evolução da expansão ao longo de 10 semanas

3.4.3.10. Reação álcalis-sílica (ASR)

Existem três tipos de reações álcali-agregado: reações álcalis-sílica, reações álcalis-silicato e as reações álcalis-carbonato. Este tipo de reações consistem na resposta dada pelos minerais que se encontram no agregado, ao desequilíbrio com o meio em que estão inseridos (meio alcalino com um pH muito elevado por vezes superior a 13).

A mais frequente e, por isso, a que foi estudada é a álcalis-sílica. Os iões (Na^+ e K^+) e hidroxilos (OH^-), normalmente derivados do cimento utilizado, presentes na solução intersticial do betão, e a sílica reativa dos agregados origina um gel sílico-alcalino. A formação deste gel pode ocorrer num ambiente seco mas a sua expansão apenas se verifica num ambiente com humidade relativa superior a 85% (MOREIRA, 2016).



A quantidade de gel e as pressões exercidas pelo mesmo variam consoante a temperatura de reação, composição de gel, tipo e proporções dos materiais reagentes, podendo induzir o desenvolvimento e propagação de microfissuras no betão.

Segundo Moreira, para que a reação aconteça é necessário que se verifiquem três situações em simultâneo:

- Presença de agregados com minerais potencialmente reativos;
- Existência de um elevado teor em álcalis;
- Condições de ambiente favoráveis (humidade, temperatura, ciclos molhagem/secagem).

De forma a avaliar esta reação, todo o procedimento seguiu a norma ASTM C1567, excluindo a proporção dos materiais para produzir as amassaduras em estudo (1:3:0,5) e os moldes a utilizar (25x25x250 mm), procedimento que não inviabiliza a comparação de resultados.



Figura 3.32: Provetes utilizados para avaliar a reação ASR

Os moldes foram preenchidos com duas camadas de argamassa, compactando-se cada uma delas com um pilão de madeira normalizado. Foi necessário ter um cuidado especial nos cantos do molde para que a argamassa envolvesse bem os pernos.

Após a desmoldagem, os provetes foram identificados (numerou-se as faces e com uma seta identificou-se o sentido da medição) e foram colocados em caixas com água de forma a ficarem totalmente submersos. Estas mesmas caixas, fechadas, foram colocadas numa estufa a 80 ± 2 ° C durante 24 horas, para acelerar as reações de hidratação. No final deste período, os provetes foram retirados da água e secos com um pano húmido, sobretudo na zona dos pernos, e procedeu-se à leitura zero imediatamente após a secagem.



Figura 3.33: Pernos colocados nas extremidades dos provetes

De seguida, substituiu-se a água por uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), previamente preparada e em quantidade suficiente para cobrir os provetes, colocando a caixa novamente na estufa.

As seguintes leituras foram realizadas aproximadamente à mesma hora, prolongando-se até aos 28 dias.

Para cada série de provetes, o defletómetro era zerado usando uma barra invar. Após a leitura, os provetes voltavam a ser colocados em estufa e realizava-se a leitura de uma outra composição.

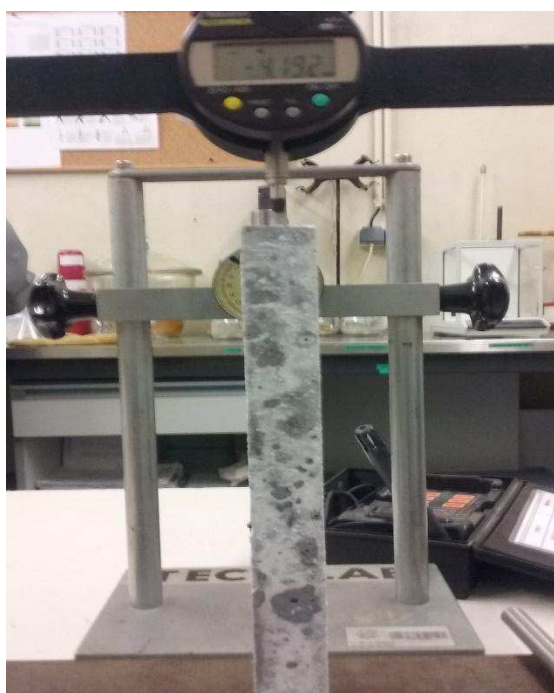


Figura 3.34: Leitura dos comprimentos dos provetes

As leituras dos comprimentos de cada provete, durante os 26 dias do ensaio, permitiram determinar a expansão de cada argamassa, através da seguinte equação:

$$Exp(\%) = \frac{LP_t - L_0}{215} \times 100 \quad (3.15.)$$

Onde:

LP_t é a média aritmética do comprimento real em cada dia de medição e de cada provete (mm);

L_0 é a média aritmética do comprimento da leitura zero (mm);

215 é a distância interna entre os pernos.

Da expressão anterior resulta a figura 3.35 com os resultados da expansão média ASR aos 28 dias:

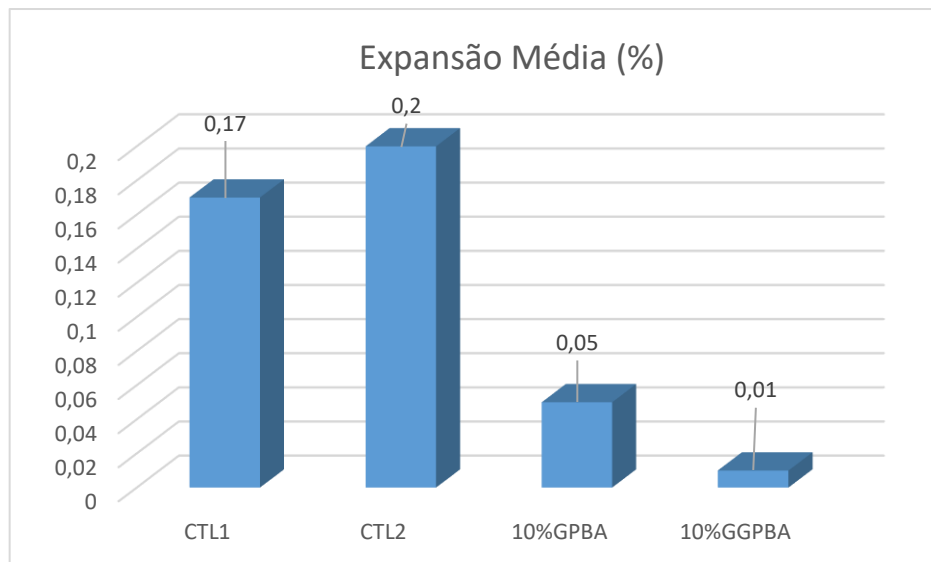


Figura 3.35: Resultados da expansão ASR ao final de 28 dias

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C 1260-Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)

ASTM C490 (2011) - Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM C1567 (2013) - Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). West Conshohocken: ASTM International.

ASTM C1437-5 (2015) - Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken: ASTM International.

E 64 (1979) - Cimentos. Determinação da massa volúmica. Lisboa: LNEC.

E 391 (1993) - Betões. Determinação da resistência à carbonatação. Lisboa: LNEC.

E 462 (2004) - Cimentos. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos. Lisboa: LNEC.

E 463 (2004) - Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa: LNEC.

COUTINHO, Joana de Sousa – CINZA DE CASCA DE ARROZ (RHA) INDUSTRIAL – ENSAIOS. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2007.

COUTINHO, Joana Sousa - Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem. FEUP Edições.1988. ISBN 9727520731.

MOREIRA, Alberto Mário Vasconcelos Tavares-Patologia do Betão. Acessível na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.2016

NP EN 196-1 (2006) - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: determinação das resistências mecânicas. Lisboa: IPQ.

NP EN 196-3 (2005) - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: determinação do tempo de presa e da expansibilidade. IPQ.

NP EN 196-6 (2010) - Métodos de ensaio de cimentos Parte 6:Determinação da finura. IPQ.

NP EN 197-1 (2012) - Cimento. Parte 1: composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. IPQ.

RILEM TC 116-PCD (1999) – Technical Recommendation: Determination of the capillary absorption of water or hardened concrete.174-179p.

4

QUEIMA DE GPBA

4.1. ENQUADRAMENTO

Perante os resultados obtidos pela realização do ensaio de Blaine, associados à observação das amostras que continham resíduos de vidro no microscópio eletrónico de varrimento e aos resultados obtidos no ensaio de resistência mecânica, concluiu-se que a presença de fibras causava interferência significativa.

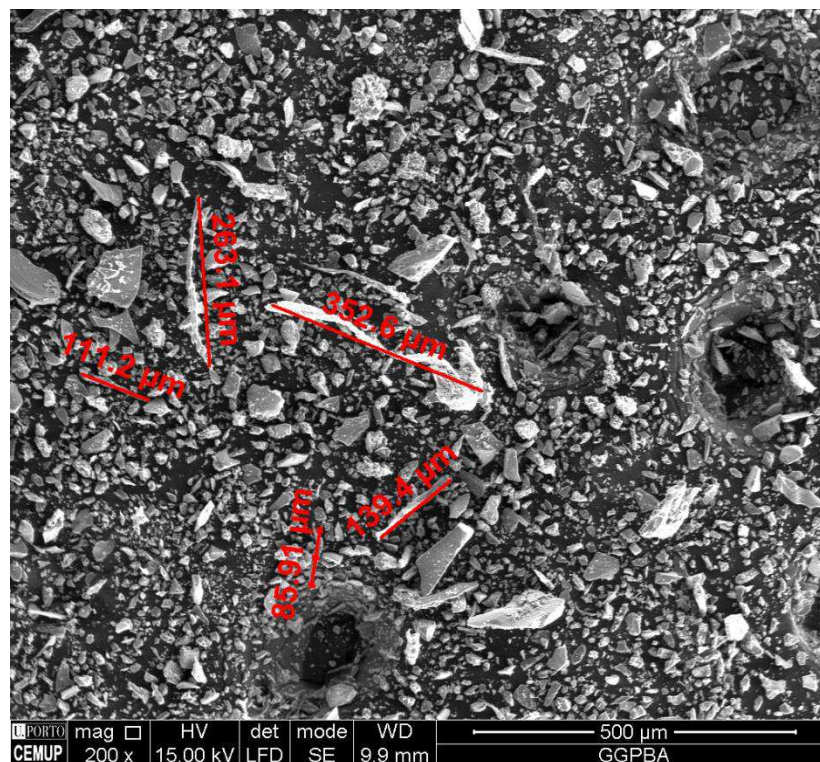


Figura 4.1: Amostra de GGPBA observada ao microscópio

Essa interferência foi, sobretudo, visível no ensaio de resistência mecânica. Os valores atingidos pelas argamassas que continham GPBA e GGPBA foram muito inferiores ao pretendido, como é possível constatar na figura 4.2, apresentando um I.A. muito inferior ao definido pela norma NP 4220, comprometendo a aplicação inicialmente esperada deste material.

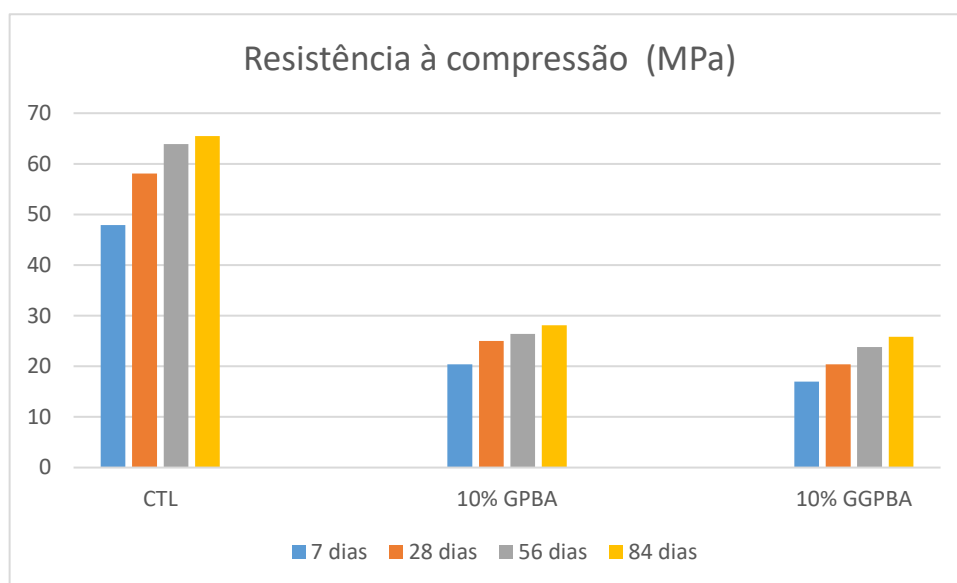


Figura 4.2: Resistência à compressão das diferentes argamassas (MPa)

Uma análise global aos ensaios realizados possibilitou constatar que as argamassas que continham GPBA apresentavam em geral maior durabilidade que as argamassas com o material moído (GGPBA), e até mesmo que as de controlo (excluindo o ensaio de carbonatação e os resultados semelhantes da resistência à penetração de cloretos), implicando que a moagem não é uma solução a ter em conta. Perante estes resultados, surgiu a possibilidade de queima do material com o intuito de eliminar as fibras e realizar ensaios de resistência mecânica de argamassas com substituição do material assim alterado.

4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Tendo em conta as figuras 3.7 e 4.1, a presença de fibras, a presença de fibras é bem visível, mesmo após a moagem com álcool (processo que conduziu apenas à redução do tamanho das fibras). A retirada de fibras do resíduo nas instalações do LEMC, não podendo recorrer a meios mais expeditos e económicos, passou pela queima de GPBA, inicialmente a uma temperatura de 400 °C com quantidades a rondar 70 a 100g colocadas em recipientes próprios, durante cerca de duas horas.

A partir da observação da figura 4.3, com especial destaque para a zona escura da amostra, a temperatura atingida não terá sido suficiente para eliminar o carbono resultante da queima das fibras.



Figura 4.3: Resultado da incineração do material GPBA a uma temperatura de 400°C

Assim considerou-se incinerar o material, pequenas porções do material original GPBA, entre 30 a 50g, a uma temperatura superior de 700 ° C durante cerca de 6 horas. É possível que a temperatura necessária para eliminar as fibras não seja tão elevada mas a limitação para terminar os ensaios de resistência mecânica em tempo útil levou a que considerasse aquele procedimento.



Figura 4.4: Homogeneização do material t_{700} GPBA

As amostras ficaram cerca de 24 horas em arrefecimento, sendo designadas por t_{700} GPBA. De seguida, recorrendo ao moinho planetário e de forma a tornar o material homogéneo, uma vez que se apresentava em forma de “torrão”, realizou-se uma moagem com as esferas de 20 mm durante 3 minutos.

A composição das argamassas e a moldagem foi feita de acordo com o ponto 3.4.2.1, mantendo o traço 1:3:0,5 e utilizando os mesmos materiais, excluindo o que substitui o cimento parcialmente.

A avaliação da resistência mecânica, tanto à compressão como à flexão, realizada de acordo com o definido nos pontos 3.4.3.4.1. e 3.4.3.4.2., aos 7 e 28 dias, apresentou resultados encorajadores, cumprindo o I.A. estabelecido pela norma NP 4220.

Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de resistência mecânica (MPa)

Argamassas	Resistência à Flexão (MPa)				Resistência à Compressão (MPa)			
	CTL	σ	t_{700} GPBA	σ	CTL	σ	t_{700} GPBA	σ
7 dias	6,5	0,1	6,2	0,5	44,5	0,6	40,7	0,3
Desempenho(%)	-	-	-5	-	-	-	-9	-
28 dias	7,4	0,2	7,1	0,1	51,5	0,6	49,9	0,6
Desempenho(%)	-	-	-4	-	-	-	-3	-

É ainda importante destacar a diferença de valores obtida relativamente à massa volúmica dos provetes moldados para realizar os ensaios de resistência mecânica. Os resultados da argamassa t_{700} GPBA, ao contrário dos resultados de GPBA e GGPBA, aproximam-se dos valores da argamassa de controlo.

Tabela 4.2: Massa volúmica dos provetes de t_{700} GPBA (g/cm³)

t_{700} GPBA	M.V.	σ
7 dias	2,32	0,50
28 dias	2,31	0,82

5

DISCUSSÃO DE RESULTADOS E
CONCLUSÕES

5.1.DISCUSSÃO DE RESULTADOS (GPBA E GGPBA)

Perante os resultados obtidos no capítulo 3, relativos ao procedimento experimental, é necessário analisar os valores e perceber o seu comportamento, efetuando uma comparação com os provetes de controlo.

Os ensaios descritos anteriormente forneceram dados que serão escrutinados e permitirão avaliar a aplicabilidade do resíduo de pó de vidro como substituto parcial do cimento. A tabela 5.1 permitiu avaliar os fatores de durabilidade, analisados entre o subcapítulo 5.1.3 a 5.1.7..

Tabela 5.1: Fatores de durabilidade

Ensaio	Tempo de cura	CTL	σ	10% GPBA	σ	10% GGPBA	σ
Absorção de água por capilaridade (mg/mm ² .min ^{0.5})	8 semanas	0,049	0,003	0,037	0,003	0,044	0,008
Desempenho (%)	-	-	-	25	-	12	-
Resistividade 84 dias (k Ω .cm)	-	4,64	0,02	6,52	0,07	6,29	0,06
Desempenho (%)	-	-	-	41	-	36	-
Carbonatação (mm)	5 semanas	3,62	1,84	9,30	1,65	11,30	1,62
Desempenho (%)	-	-	-	-157	-	-212	-
ASR 28 dias (%)	-	0,19	0,07	0,05	0,02	0,01	0,01
Desempenho (%)	-	-	-	74	-	95	-
Resistência à penetração de cloretos (x 10 ⁻¹² m ² /s)	8 semanas	14,04	0,00	15,98	0,01	13,50	0,01
Desempenho (%)	-	-	-	-11	-	3	-

Por sua vez, a tabela 5.2 é essencial para compreender a evolução da resistência mecânica dos provetes com 10% de substituição de cimento por GPBA e GGPBA.

Tabela 5.2: Resistência mecânica, Desempenho e I.A.

Resistência à Compressão (MPa)						
Argamassas	CTL	σ	10%GPBA	σ	10%GGPBA	σ
7 dias	47,9		20,4		17,0	
Desempenho(%)	-	-	-57	-	-65	-
28 dias	58,0		25,0		17,0	
Desempenho(%)	-	-	-57	-	-71	
I.A. (%)	-	-	43	-	29	-
56 dias	63,9		26,4		23,8	
Desempenho(%)	-	-	-59	-	-63	-
84dias	65,5		28,1		25,8	
Desempenho(%)	-	-	-57	-	-61	-

5.1.1. ANÁLISES QUÍMICAS

As normas NP EN 197 e NP 4220 definem propriedades como a perda ao fogo, resíduo insolúvel, teor de sulfatos e a pozolanicidade.

A presença de cloretos no betão é nociva, obrigando à limitação da quantidade de cloretos no cimento, determinada pela NP EN 196-2, sendo que o seu limite deverá ser inferior a 0,1% da massa do cimento para todos os cimentos correntes e o teor de cloretos de todos os constituintes do betão devem ser somados (NP EN 197-1). No entanto, como se pretende usar este material como substituto parcial do cimento em princípio de 10%, o valor final de cloretos a introduzir seria muito abaixo do limite, pelo que não será esta questão a impedir o seu uso.

Tabela 5.3: Propriedades químicas

Propriedades	Norma	Análises químicas GPBA	Critérios de aceitação
Perda ao fogo	NP 4220	12,27%	$\leq 9 \%$
Cloretos	EN 197.1	0,16 %	$\leq 0,10 \%$
Álcalis (expressos em Na₂Oeq e K₂O)	NP 4220	10,55 %	$\leq 5,0\%$

A norma portuguesa NP 4220 define como critério de aceitação uma percentagem de perda ao fogo (P. Rubro), isto é, uma perda de massa do cimento a 1000 °C. Atendendo ao facto deste resíduo conter uma quantidade de fibras, quando o material é aquecido a 1000 °C as fibras são incineradas contribuindo para a perda de massa. Além disso é provável que o óxido de cálcio na análise química (11%), possa estar sob a forma de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio, logo a sua incineração corresponderá a uma perda de massa. A perda ao fogo inclui não só carbono, mas também água quimicamente combinada ou dióxido de carbono fixo (RAMOS *et al.*, 2014).

Apesar do valor que diz respeito ao teor de álcalis ser muito elevado, a expansão observada nos ensaios ASR demonstraram que a utilização de GPBA e GGPBA contribui para a redução da expansão.

5.1.2.RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

A constatação de que o material utilizado, antes e após a moagem, não pode ser utilizado é confirmada pelos valores atingidos após a realização dos ensaios de resistência mecânica. Os resultados ficaram muito aquém do desejável.

A observação da figura 5.1 permite concluir que os valores das resistências mecânicas das argamassas com resíduos de vidro não atingiram nem metade dos valores obtidos pelos provetes de controlo.

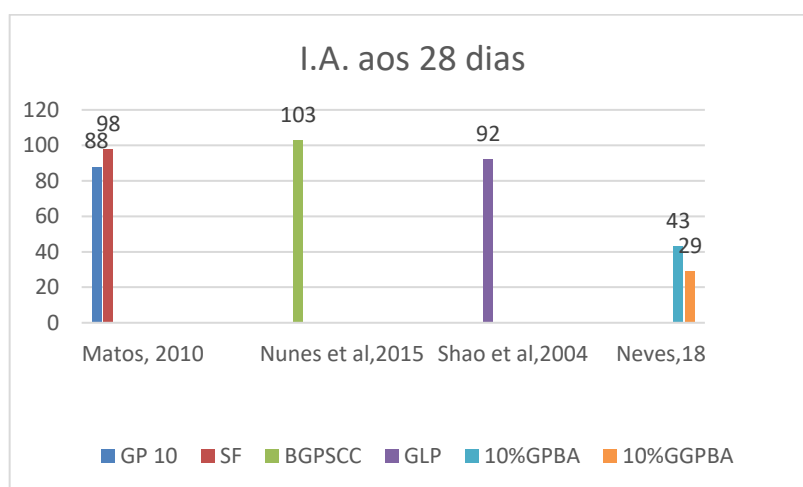


Figura 5.1: I.A. aos 28 dias

A incorporação deste tipo de material tem produzido resultados interessantes, mesmo quando a sua aplicação é feita em betão: Nunes *et al.* (BGP SCC) obtiveram excelentes resultados atingindo resistências superiores às de controlo. Shayan e Xu já tinham comprovado que, com uma percentagem de 10% de substituição parcial do cimento, este tipo de material obteve resultados prometedores, resultados corroborados por Matos.

Estes resultados contrastam, e muito, com os resultados obtidos com GPBA e GGPBA.

A presença de fibras interfere significativamente na compactação, comprometendo a sua utilização em ligantes para aplicações estruturais.

5.1.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Em relação a materiais cimentícios, a maior dificuldade em transportar corrente pode ser avaliada através da medição da resistividade elétrica, permitindo a comparação entre as argamassas se o ensaio for realizado em condições semelhantes e à mesma idade.

Os valores obtidos aos 7, 28 e 84 dias demonstram que a argamassa com 10% GPBA apresenta uma resistividade mais elevada quando comparada com a de controlo e com 10% GGPBA, isto é a rede porosa parece ser menos profusa e os poros menos interligados.

Num mesmo estudo referido na presente dissertação de Nunes *et al.*, a resistividade elétrica em betão auto-compactável com resíduos de vidro na sua composição produziu valores interessantes, atingindo também resultados superiores aos de controlo.

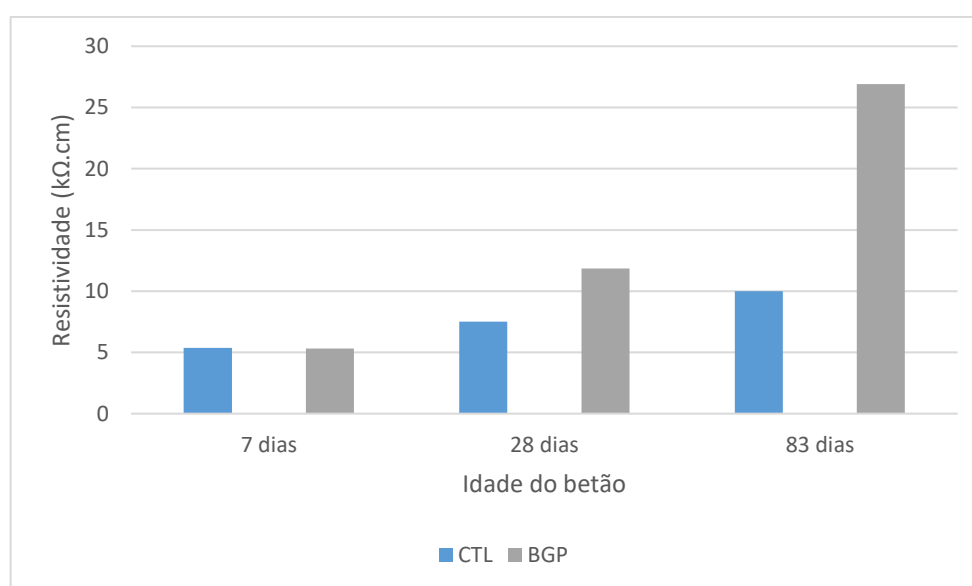


Figura 5.2: Resistividade elétrica (NUNES *et al.*, 2013)

Kamali e Ghahremaninezhad utilizaram dois resíduos de pó de vidro muito semelhantes fornecidos por uma empresa de vidro: GP1, proveniente dos resíduos de polímeros com fibra de vidro e GP2, proveniente da reciclagem de vidro, e ainda cinzas volantes, FA, como substituto parcial de cimento na produção de pastas cimentícias.

A evolução dos resultados do ensaio de resistividade elétrica realizado pelos autores, apresentados na figura 5.2, são semelhantes aos obtidos durante esta dissertação, confirmando uma melhoria das argamassas com GP em relação à de controlo.

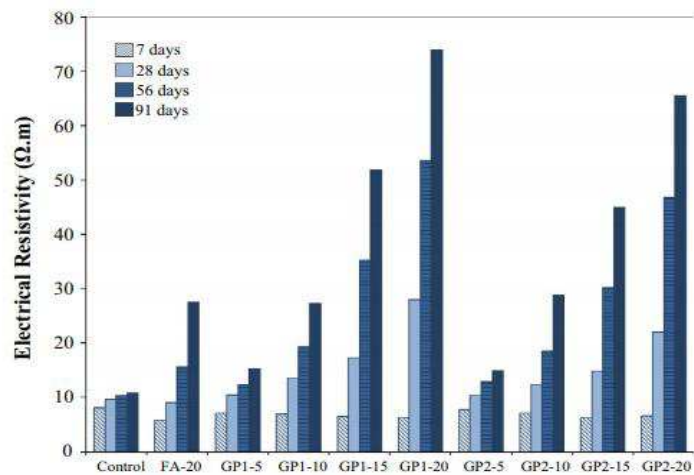


Figura 5.3: Resistividade elétrica das diferentes pastas cimentícias (KAMALI e GHAREMANINEZHAD,2016)

5.1.4. CARBONATAÇÃO ACELERADA

Os resultados obtidos confirmam resultados de diferentes estudos anteriores: a profundidade de carbonatação dos provetes com uma percentagem de resíduos de vidro é superior à de controlo (100% CEM I 42,5R). O hidróxido de cálcio consumido na reação pozolânica permitiu que a frente de carbonatação progredisse mais rapidamente.

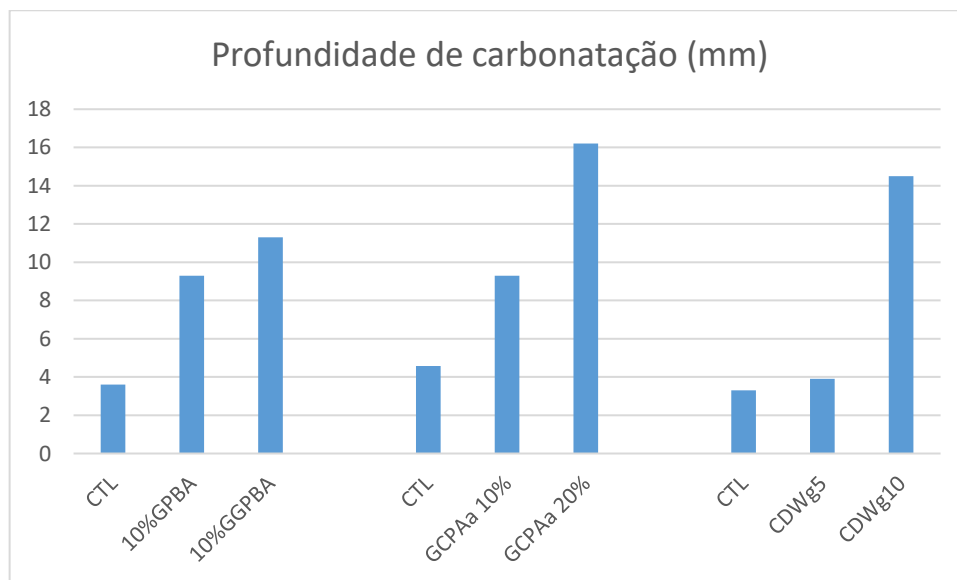


Figura 5.4: Profundidade de carbonatação (RAMOS *et al.*,2014, ROCHA,2016)

Mesmo quando se trata de outro tipo de materiais utilizados como substituto parcial do cimento, sejam eles resíduos de construção de demolição, utilizados por Rocha (CDW) ou cinzas de resíduos de cortiça moídas (GCPA), utilizados por Ramos *et al.*, a profundidade de carbonatação foi superior à de controlo.

5.1.5. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Os resultados obtidos a partir do ensaio de absorção de água por capilaridade implicam que a argamassa 10% GPBA apresenta um melhor comportamento neste aspeto relativamente às restantes.

Matos e Sousa-Coutinho conseguiram obter coeficientes de absorção superiores aos de controlo apenas quando aumentou a percentagem de substituição para 20%. Quando esta foi de 10%, o coeficiente de absorção foi abaixo do valor obtido pelo de controlo, semelhante ao que acontece com 10% GGPBA e o resultado de CTL da presente dissertação.

Tabela 5.4: Coeficiente de absorção (MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012)

Argamassas	Coeficiente de absorção ($\text{mg}/\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$)	Desvio padrão
CTL	0,0477	0,0142
SF	0,0394	0,0004
WGP10	0,0471	0,0032
WGP20	0,0480	0,0038

Matos *et al.* avaliaram a absorção por capilaridade nos provetes de betão autocompactável com e sem resíduos de vidro.

Tabela 5.5: Coeficiente de absorção (MATOS *et al.*, 2016)

Provetes	Coeficiente de absorção ($\text{mg}/\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$)
CTL	0,0310
BGP	0,0255

Os resultados apresentados, semelhantes aos resultados obtidos nesta dissertação, demonstraram que a incorporação de resíduos de vidro melhoraram a homogeneidade da microestrutura e refinamento da rede porosa, resultando num coeficiente de absorção mais baixo e menor porosidade capilar (MATOS *et al.*, 2016).

5.1.6. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Efetuada uma análise e, posteriormente, uma comparação com os resultados obtidos em trabalhos realizados anteriormente, onde os ensaios para avaliar a resistência à penetração de cloretos foram

realizados em condições semelhantes mas com resíduos diferentes, concluiu-se que os valores do coeficiente de difusão são semelhantes aos de controlo.

Este facto é sobretudo visível no trabalho de Silva. Os resultados, expressos na tabela 5.6, surgem a partir da análise de 3 provetes para cada composição.

Tabela 5.6: Coeficiente de difusão (SILVA. 2016)

Argamassa	D_{ns} (10^{-12} m ² /s)	Desvio-Padrão
CTL	14,19	1,80
10CDW	12,77	0,58
10MP	13,04	0,88
5CDW+ 5MP	15,06	0,41

O desvio-padrão de 1,8 obtido para a série de referência (CTL) levou a considerar que todas as argamassas poderiam ser inseridas na mesma classe uma vez que a diferença entre os coeficientes de difusão não é significativa.

O mesmo acontece no caso presente, onde as argamassas que contêm resíduos de vidro e o controlo podem ser classificadas de forma semelhante porque não existem diferenças significativas entre os valores obtidos.

5.1.7. ASR

A expansão sofrida pelos provetes fabricados com resíduos de vidro confirma um desenvolvimento da reação pozolânica. Os álcalis presentes no pó de vidro são consumidos antes de ocorrerem as reações ASR, à semelhança de estudos como o de Matos e Sousa-Coutinho, expostos em 2.3.1., ou como o de Khmiri, Chaabouni e Samet.

O trabalho desenvolvido não pretendia determinar a reatividade do agregado, mas sim o efeito da substituição do cimento por materiais como o GP e, em ambos, os resultados apresentados não ultrapassam o limite de 0,1%, sendo que aqueles cuja dimensão das partículas é menor apresentam melhores resultados. Neste caso 10% GGPBA apresenta uma expansão quase nula.

5.2. CONCLUSÕES (GPBA E GGPBA)

Como se sabe de alguns estudos mais recentes, a carbonatação de materiais cimentícios com pozolanas é, em geral, mais elevada, devido ao consumo de hidróxido de cálcio na altura da hidratação. Este facto, já mencionado no ponto 5.1.4., implica que existe uma menor quantidade de Ca(OH)_2 para reagir com o CO_2 que vai penetrando através da rede porosa, contribuindo para uma carbonatação mais rápida.

Excluindo esta questão da carbonatação e os resultados semelhantes para as diversas argamassas obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos, a análise de resultados de uma forma geral permite verificar que a durabilidade é superior, relativamente à de controlo, quando se incorpora qualquer um dos resíduos. Para o material não moído (GPBA), a absorção e a resistividade apresentam melhor

desempenho que o material moído (GGPBA), que por sua vez apresenta melhor desempenho no que concerne à ASR.

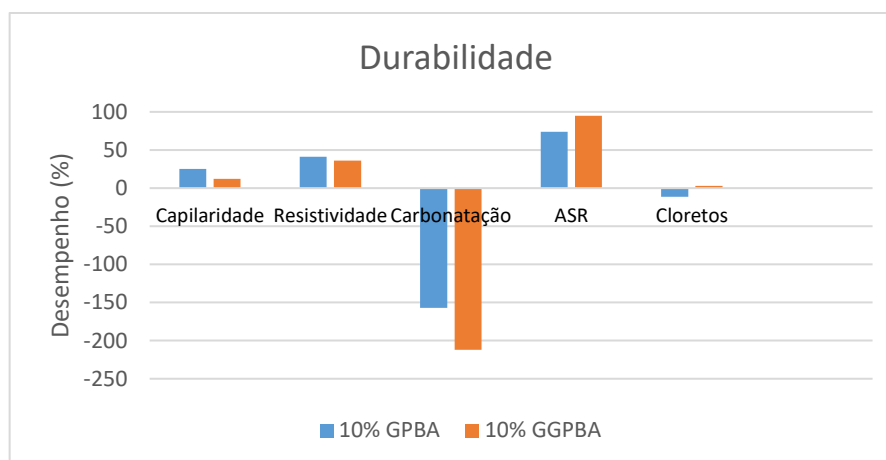


Figura 5.5: Análise geral de resultados dos fatores de durabilidade

Apesar de alguns resultados serem animadores, GPBA e GGPBA não poderão ser utilizados em aplicações estruturais, o que por si só compromete a sua utilização.

5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS APÓS QUEIMA

Uma análise das massas volúmicas das argamassas, obtidas a partir do valor da massa dos provetes do ensaio da resistência mecânica e observáveis na figura 5.6, reforça ainda mais a ideia de que as fibras tiveram uma interferência grande e que a moagem destas não contribui para uma compactação eficiente, também com diminuição da resistência e durabilidade (em geral).

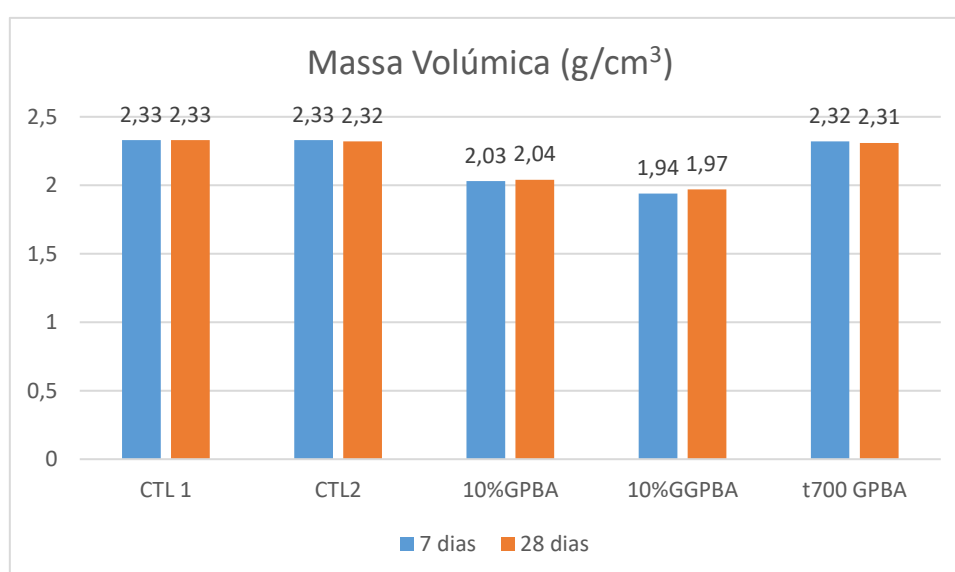


Figura 5.6: Massa volúmica dos diferentes provetes

A durabilidade das argamassas com resíduo de vidro moído apresenta uma durabilidade, avaliada com a capilaridade e resistividade, ligeiramente inferior à do resíduo sem tratamento. Uma explicação possível poderá ser de durante a moagem se criarem novelos de fibras que interferem com a compactação e posterior hidratação do material. Note-se que ambas estas facetas da durabilidade, resistividade e absorção por capilaridade, avaliam a interconectividade da rede porosa.

Como já foi referido anteriormente, as resistências mecânicas obtidas, tanto à flexão, como à compressão (representado na figura 5.7), não satisfazem os parâmetros pretendidos, sobretudo pela influência das fibras, que interferem no processo de compactação, tornando-o menos eficaz, resultando em valores da massa volúmica e de resistência mecânica mais baixos.

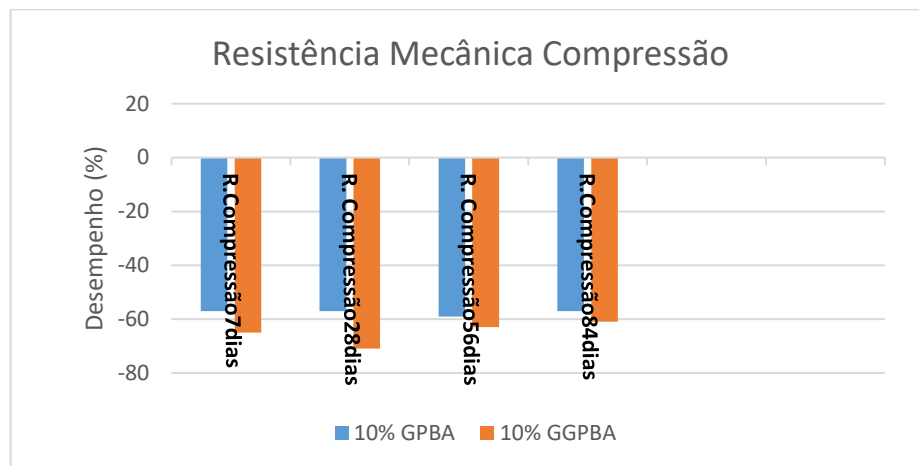


Figura 5.7: Resistência à compressão

Contribuindo para esta análise, a figura 5.8 expõe os diferentes índices de atividade para as argamassas com 10% de substituição de cimento revelando bem o contraste de valores da solução que passa pela moagem de fibras e da solução que pretende a eliminação das mesmas. Os valores atingidos por esta nova solução revelam-se bastante satisfatórios, cumprindo a norma NP 4220 no que ao índice de atividade diz respeito.

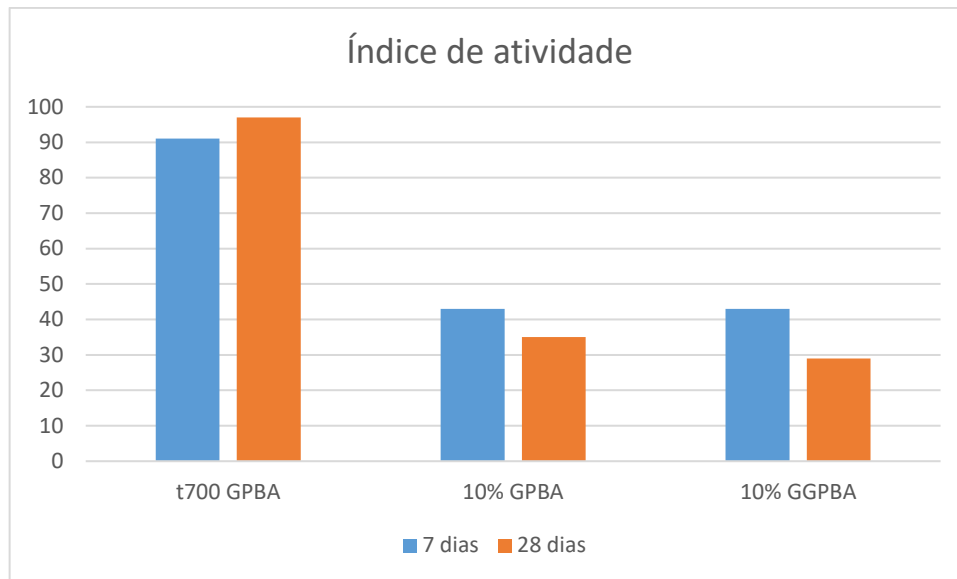


Figura 5.8: I.A. obtido com os diferentes materiais

GPBA e GGPBA embora apresentem facetas positivas em termos de durabilidade, conduzem a resistências muito abaixo dos requisitos impedindo a sua aplicação estrutural. No entanto, a eliminação das fibras por queima conduz a resistências muito animadoras.

5.4. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os pontos seguintes surgem perante a necessidade de complementar o trabalho e melhorar alguns aspetos na abordagem a este tipo de resíduo estudado:

- Repetir o programa experimental para o resíduo de vidro após a queima do material;
- Eliminar as fibras do resíduo a partir de uma solução diferente como a separação por gravidade;
- Utilizar GP como adição em betão, avaliando o comportamento do betão;
- Efetuar uma moagem mais fina do resíduo já sem fibras de forma a maximizar os efeitos de GP;
- Realizar estudo económico considerando processos possíveis e verificar se tem interesse a valorização deste resíduo.

5.5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KAMALI, Mahsa; GHAREMANINEZHAD, Ali - An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders. *Construction and Building Materials*. . ISSN 09500618. 112:2016) 915–924. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.085.

KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET, B. - Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials*. . ISSN 09500618. 44:2013) 74–80. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040.

MATOS, Ana Mafalda - Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2010.

MATOS, Ana Mafalda et al. - Durability Enhancement Of SCC With Waste Glass Powder. *Materials Research*. . ISSN 1516-1439. 19:1 (2016) 67–74. doi: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0288.

MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana - Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*. . ISSN 09500618. 36:2012) 205–215. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027.

NUNES, Sandra et al. - Mixture design of self-compacting glass mortar. *Cement and Concrete Composites*. . ISSN 09589465. 43:2013) 1–11. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.05.009.

RAMOS, Telma; MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana - Strength and Durability of Mortar Using Cork Waste Ash as Cement Replacement. *Materials Research*. . ISSN 1516-1439. 17:4 (2014) 893–907. doi: 10.1590/S1516-14392014005000092.

ROCHA, Telma Sabina Vieira - Resíduos de Construção e Demolição como substituto parcial do cimento- Efeito na durabilidade de materiais cimentícios. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2016.

SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin - Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*. . ISSN 00088846. 34:1 (2004) 81–89. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00251-5.

SILVA, Ana Filipa Cadima - Resíduos de Mármore e Resíduos de Construção e Demolição no cimento. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2016.

ANEXOS

Anexo A: FICHA TÉCNICA DO CIMENTO CEM I 42,5R


RESULTADOS DO AUTOCONTROLO
 AUTOCONTROL RESULTS / RÉSULTATS DE L'AUTOCONTRÔLE
 VALORES MÉDIOS
 AVERAGE RESULTS / RÉSULTATS MOYENNES

REFERÊNCIA Cimento Portland - EN 197-1 CEM I 42,5 R
 REFERENCE Portland Cement / Ciment Portland

BOLETIM Nº ACM-0047 (2017)
 REPORT N.º / RAPPORT N.º

FÁBRICA Macieira-Liz
 PLANT / USINE

DATA 14/10/2017
 DATE

Mês Outubro 2017
 MONTH / MOIS October / Octobre
ENSAIOS MECÂNICOS

MECHANICAL TESTS / ESSAIS MÉCANIQUES (NF EN 197-1)

IDADE AGE	Resistência à Tração (MPa) Tension Strength Résistance à la Traction		Resistência à Compressão (MPa) Compression Strength Résistance à la Compression	
	MÉD. MONTH / MOIS	ANO YEAR / AN	MÉD. MONTH / MOIS	ANO YEAR / AN
7 dias days / jours	5,0	5,6	33,4	31,1
7 dias days / jours	8,1	7,5	45,8	47,5
28 dias days / jours	8,0	8,7	58,4	58,3

ENSAIOS FÍSICOS

PHYSICAL TESTS / ESSAIS PHYSIQUES

	MÉD. MONTH / MOIS	ANO YEAR / AN
Peso Específico (g/cm³) Specific Weight / Poids spécifique	3,10	3,12
Resíduo de Penetração (%) Sum Residue / Résidu de Penétrage (NF EN 186-2)	40 µm 32 µm	3,0 10,2
Superfície Específica do Blasto (m²/g) Blasto Spec. Surface / Surface spécifique Blasto (NF EN 186-2)	4121	3739
Água na Pasta Normal (%) Water Content / Teneur Glucose (NF EN 186-2)	28,8	28,5
Tempo de Finos (min) Setting Time / Tempo de Finais (NF EN 186-2)	Initial min / sec 222	181 248
Capacidade (mm) Consistency / Consistency (NF EN 186-2)	1	1
Índice de Particulação - Y (%) (0 a 100) Nefelometry / Nefelometry	27	26

INFORMAÇÃO ADICIONAL

ADDITIONAL INFORMATION / INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

--

ANEXO 1 (NF EN 186-2) - 14 dias: 12 horas, 12 horas, 12 horas, 12 horas.
 NOTA: NOTAS - Os resultados são obtidos por meio de ensaios realizados nos dias
 7, 14, 28 e 56 dias. Os resultados são obtidos por meio de ensaios realizados nos dias
 7, 14, 28 e 56 dias. Os resultados são obtidos por meio de ensaios realizados nos dias
 7, 14, 28 e 56 dias.

ANÁLISE QUÍMICA

CHEMICAL ANALYSIS / ANALYSES CHIMIQUES

	MÉD. MONTH / MOIS	ANO YEAR / AN
Perda ao Fogo (%) Loss on Ignition / Perte au Feu	-	2,47
Resíduo Insolúvel (%) Insoluble Residue / Résidu Insoluble	-	1,35
Óxido de Silício (%) Silicon Oxide / Oxyde de Silicium	SiO ₂	20,37
Óxido de Alumínio (%) Aluminum Oxide / Oxyde de Aluminium	Al ₂ O ₃	4,82
Óxido de Ferro (%) Iron Oxide / Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	2,82
Óxido de Cálcio (%) Calcium Oxide / Oxyde de Calcium	CaO	62,02
Óxido de Magnésio (%) Magnesium Oxide / Oxyde de Magnesium	MgO	1,81
Sulfato (%) Sulfate / Sulfate	SO ₃	3,10
Óxido de Potássio (%) Potassium Oxide / Oxyde de Potassium	K ₂ O	0,75
Óxido de Sódio (%) Sodium Oxide / Oxyde de Sodium	Na ₂ O	0,17
Clorato (%) Chlorate / Chlorate (NF EN 186-2)	Cl	0,05
Cal Livre (%) Free Lime / Chaux libre		1,48
Índice de Solubilidade em Cal Lime Solubility Factor / Coefficient de Solubilité		
Índice Silíceo Silica Ratio / Indice Siliceux		
Índice Alumínico Alumina Ratio / Indice Alumineux		

ANÁLISE MINERALÓGICA (XRD/ETD)

MINERALOGICAL ANALYSIS / ANALYSE MINÉRALOGIQUE

Silicato Tricálcico (%) Tricalcium Silicate / Silicate Tricalcique	C ₃ S	62,9	61,3
Silicato Bicalcico (%) Bicalcium Silicate / Silicate Bicalcique	C ₂ S	12,5	13,0
Aluminato Tricálcico (%) Tricalcium Aluminate / Aluminato Tricalcique	C ₃ A	4,1	4,4
Ferro-aluminato Tetracálcico (%) Ferrite / Ferro-aluminato Tetracalcique	C ₄ AF	9,8	10,5

APROVADO

APPROVED / APPRÉHÉ

PEDRO
DUSÉRIO
LOPES GAGO

Engenheiro
PDR (2015) (EN 186-2)
LAV
Data: 01/11/17
00:00

Anexo B: ANÁLISE QUÍMICA DO GPBA

Amostras I Amostra com referência: GPBA (sem descrição da amostra)
A amostragem é da responsabilidade do requerente

Requerente FEUP-DEC Joana Sousa Coutinho
Endereço FEUP – Rua Dr. Roberto Frias S/nº – 4200-465 PORTO
Req. NEC I48/6700/C17

Estudo Solicitado Análise de Elementos Maiores

Método Instrumental Dosagem de elementos Maiores/Fluorescência de Raios-X
Metodologia Método Interno - PA 003/FRX (2010-10-15)

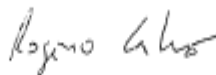
Sector: Fluorescência de Raios-X **Registo:** 596 FRX
Data de início da Análise: 13-12-2017 **Data de Conclusão da Análise:** 19-12-2017

(Resultados dados em %)

Elementos	GPBA
SiO ₂	60,91
Al ₂ O ₃	2,54
Fe total (Fe ₂ O ₃)	1,15
MnO	0,03
CaO	10,78
MgO	1,07
Na ₂ O	9,63
K ₂ O	0,92
TiO ₂	0,15
P ₂ O ₅	0,16
P. Rubro	12,27

S. Mamede de Infesta, 22 de Dezembro de 2017

O Responsável Técnico do Sector de FRX,



Rogério Calvo
(Eng.º Químico)

Rua do Azeite, Apartado 109
4444-901 S. MAMEDE DE INFESTA - Portugal
Tel: +351 251 440 000
Fax: +351 251 14 640
www.feg.pt

Este Relatório não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção da UCTM-Lab.
Os resultados referem-se exclusivamente às análises realizadas e citadas. Qualquer interpretação é de exclusiva
responsabilidade do requerente.

Colecção 2010
Mod. nº 013

19/JUN2018

• • •

<i>f</i> Amostras	1 Amostra com referência: GPBA (sem descrição da amostra)
	A amostragem é da responsabilidade do requerente
Requerente	FEUP-DEC Joana Sousa Coutinho
Endereço	FEUP – Rua Dr. Roberto Frias S/nº – 4200-465 PORTO
	Req. NEC 148/6700/C17
Estudo Solicitado	Determinação do teor de SO ₃
Método Instrumental	Análise Semi - Quantitativa/ Fluorescência de Raios-X
Metodologia	Método Interno - PA 004/FRX (2010-10-15)
Sector: Fluorescência de Raios-X	Registo: 596FRX
Data de início da Análise: 13-12-2017	Data de Conclusão da Análise: 19-12-2017

Análise Semi- Quantitativa

Ref amostra	SO ₃ (%)
GPBA	0,49

S. Mamede de Infesta, 22 de Dezembro de 2017

O Responsável Técnico do Sector de FRX,

Rogério Calvo
 Rogério Calvo
 (Eng.º Químico)

Porto de Análise, Rua da 1.ª
 4444-901 S. MAMEDE DE INFESTA - Portugal
 Tel: (+351) 228 491 000
 Fax: (+351) 228 491 000
 www.lisap.pt

Este Relatório não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção da LISAP-Lab.
 Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e analisadas. Qualquer interpretação é de exclusiva
 responsabilidade do requerente.

Coleção 2010
 Mod. nº 013

18JUN2016

• • •



Amostras Amostra de Cimento (?) - GPBA
A amostragem é da responsabilidade do requerente

Requerente FEUP - DEC - Joana Sousa Coutinho
Endereço Rua Dr. Roberto Frias S/nº - 4200-465 PORTO

Estudo Solicitado Análise de Clóretos solúveis em HNO_3 **Req. NE 148/6700/C17**

Método Instrumental Argentometria
Metodologia PA002QC

Sector: ABSORÇÃO ATÓMICA
Data de Início da Análise: 07/ 12/ 17 **Registo:**
Data de Conclusão da Análise: 07/ 12/ 17

AMOSTRA	% Cl
GPBA	0.16

NOTA: Ensaio realizado em triplicado. Método controlado com o MRC 65-N.

S. MAMEDE DE INFESTA, 13 de Dezembro de 2017

O Investigador Auxiliar

(Dr.ª Maria Adelaide Ferreira)

Rua da Ferreira, Auxiliar 1199
4440-951 S. MAMEDE DE INFESTA - Portugal
Tlx (+351) 229 499 808
Fax (+351) 229 514 060
www.lqap.pt

Esta Solução não pode ser parcialmente reproduzida sem autorização por escrito dada pela Direcção do UCTM-Lab.
Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e analisadas. Qualquer cópia ou reprodução é da exclusiva
responsabilidade do requerente.

Colocação 2010
Mod. nº 013

15/JUN/2015

• • •

Anexo C: LEITURAS ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Referência	Área cm²	Registos de pesagem dos provetes (em 10s de tempo (min))										Absorção Capilar por unidade de área da superfície de teste (mg/cm²)										
		P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
CTL1.1	7853,36	871,3200	873,5800	874,3000	874,3000	875,1600	875,4700	875,7200	876,3600	877,8000	878,4700	884,05	3,1623	4,4721	5,4772	6,3246	7,0711	7,7460	10,3645	13,4164	15,4918	37,9473
CTL1.2	7853,36	871,0000	873,2600	873,3100	873,3100	873,7100	874,0000	874,2300	874,3800	875,1800	875,8100	883,27	0,2678	0,3705	0,4278	0,4724	0,5083	0,5386	0,6650	0,7865	0,8671	15,623
CTL1.3	7853,36	872,3000	873,2000	874,4700	875,3600	877,3500	877,6500	877,9200	878,1000	880,0000	880,6500	886,21	0,3531	0,4545	0,5163	0,5666	0,6048	0,6332	0,7383	0,9040	0,9868	16,947
GGPEA1	501185	835,2300	835,1000	835,1000	835,2600	835,5700	836,1700	836,3600	837,3000	838,5100	839,2100	704,43	0,2637	0,3270	0,3707	0,4034	0,4344	0,4581	0,5554	0,6715	0,7333	14,260
GGPEA2	501185	836,8600	836,1600	831,4200	831,5300	832,3100	832,6400	832,9200	834,2000	835,2300	835,2600	702,58	0,2419	0,3195	0,3532	0,4006	0,4176	0,4267	0,6035	0,7397	0,8845	1,216
GGPEA3	501185	836,3600	835,0500	835,6000	835,0100	830,3000	830,4400	830,1500	831,5300	832,3500	833,6200	633,11	0,2712	0,3235	0,3507	0,4163	0,4468	0,4730	0,6078	0,7075	0,7683	14,951
CTL2.1	501185	885,3400	885,5900	885,5900	887,0000	887,4300	887,4400	888,0000	888,2300	890,0700	890,4700	896,57	0,3786	0,4707	0,4568	0,5105	0,5492	0,5816	0,7352	0,8400	0,9236	16,845
CTL2.2	501185	887,1600	884,3000	885,1600	886,3800	886,8200	887,1900	887,4300	888,2600	893,7700	890,4700	896,57	0,4056	0,4933	0,5766	0,6316	0,6777	0,7152	0,8862	0,9398	1,0871	18,915
CTL2.3	501185	885,6400	886,3300	886,3500	889,4400	889,1600	890,05	890,3300	891,5700	892,4400	893,0900	893,17	0,3710	0,3682	0,4456	0,4893	0,5555	0,5719	0,7152	0,8238	0,9043	16,972
10GGPEA.1	7853,36	728,6300	730,47	730,35	731,2300	731,5700	731,3900	731,9800	733,0000	735,0000	734,2800	733,17	0,2343	0,2836	0,3320	0,3670	0,3944	0,4181	0,5454	0,6328	0,7052	14,184
10GGPEA.2	7853,36	728,0400	724,4400	724,6400	724,3800	725,2700	725,1300	725,7500	726,7800	731,5000	728,0600	733,43	0,2674	0,3245	0,3670	0,4032	0,4331	0,4606	0,5916	0,6815	0,7514	14,579
10GGPEA.3	7853,36	721,8000	723,4300	723,8200	730,1100	730,3400	730,3900	730,7500	731,6600	732,2300	732,8000	731,30	0,2075	0,2521	0,2883	0,3170	0,3482	0,3682	0,4918	0,5604	0,6241	12,860

Anexo D: RESISTIVIDADE ELÉTRICA 84 DIAS

Data do ensaio	Ref.ª série	Número da amostra	Tensão (Volts)	Intensidade de corrente (A)	Resistência elétrica	l (m)	rede 1	rede 2	ρ (k Ω .cm)	$\rho_{\text{médio}}$ (k Ω .cm)	$\rho_{\text{médio}} - \text{série}$ (k Ω .cm)	Desvio(k Ω .cm)	δ (%)
15/05/2018	CTL 1	1	6,9874	0,0015151	4611,84	0,16	0,04	0,04	4,61	4,65	4,64	0,06	1,39
			6,9901	0,0014932	4681,29				4,68				
		2	6,9888	0,0014875	4698,35				4,70	4,70			
			6,9887	0,0014865	4701,45				4,70				
		3	6,9864	0,0015284	4571,05				4,57	4,57			
			6,9866	0,0015284	4571,19				4,57				
	CTL 2	1	6,9865	0,0015365	4547,02	0,16	0,04	0,04	4,55	4,55	4,63	0,11	2,40
			6,9865	0,0015364	4547,32				4,55				
		2	6,9897	0,0014702	4754,25				4,75	4,75			
			6,9899	0,0014699	4755,36				4,76				
		3	6,9868	0,0015248	4582,11				4,58	4,58			
			6,9867	0,001525	4581,44				4,58				
	10% GPBA	1	7,0098	0,0010827	6474,37	0,16	0,04	0,04	6,47	6,48	6,52	0,06	0,95
			7,0098	0,0010824	6476,16				6,48				
		2	7,01	0,0010799	6491,34				6,49	6,49			
			7,0098	0,0010797	6492,36				6,49				
		3	7,0109	0,001064	6589,19				6,59	6,59			
			7,0109	0,0010638	6590,43				6,59				
	10% GGPBA	1	7,0087	0,0011057	6338,70	0,16	0,04	0,04	6,34	6,34	6,29	0,06	0,98
			7,0087	0,0011059	6337,55				6,34				
		2	7,0087	0,0011103	6312,44				6,31	6,31			
			7,0085	0,0011104	6311,69				6,31				
		3	7,0077	0,0011269	6218,56				6,22	6,22			
			7,0076	0,0011262	6222,34				6,22				

Anexo E: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Série	Ref. ^a	ρ (K Ω .cm)	ρ_m (K Ω .cm)	Desvio	δ (%)	Temperatura média (°C)	Tensão (Volts)
GGPBA	1	6,41	6,63	0,42	6,26	23,19	25,00
	2	7,11				22,89	
	3	6,38				22,59	
CTL1	1	5,19	5,43	0,21	3,79	22,49	19,89
	2	5,55				22,08	
	3	5,54				22,30	

Série	Ref. ^a	ρ (K Ω .cm)	ρ_m (K Ω .cm)	Desvio	δ (%)	Temperatura média (°C)	Tensão (Volts)
CTL2	1	5,27	5,34	0,33	6,23	26,05	25,27
	2	5,70				25,05	
	3	5,04				25,55	
GPBA	1	5,29	5,45	0,17	3,04	26,05	25,36
	2	5,62				25,40	
	3	5,44				25,99	

Anexo F: VALORES MÉDIOS DA DEFORMAÇÃO DEVIDO AO ATAQUE POR SULFATOS

10% GPBA

Tempo	Data	Hidróxido de Cálcio					Sulfato de Sódio			
		Barra	1	3	5		Barra	2	4	6
Leitura 0	11/04/2018	1,423	3,579	3,813	3,816		1,420	3,917	4,156	4,027
2ª	24/04/2018	1,407	3,549	3,788	3,810		1,409	3,896	4,129	4,002
4ª	09/05/2018	1,411	3,548	3,788	3,792		1,411	3,901	4,136	4,011
6ª	23/05/2018	1,411	3,550	3,787	3,790		1,417	3,888	4,121	4,007
8ª	06/06/2018	1,413	3,560	3,801	3,805		1,419	3,923	4,156	4,031
10ª	20/06/2018	1,409	3,540	3,781	3,785		1,411	3,899	4,134	4,010

10% GGPBA

Tempo	Data	Hidróxido de Cálcio					Sulfato de Sódio			
		Barra	1	3	5		Barra	2	4	6
Leitura 0	23/03/2018	1,396	3,817	3,709	3,863		1,404	3,794	3,911	3,341
2ª	06/04/2018	1,405	3,807	3,700	3,854		1,405	3,788	3,908	3,338
4ª	20/04/2018	1,409	3,803	3,697	3,853		1,405	3,789	3,909	3,338
6ª	03/05/2018	1,413	3,812	3,707	3,861		1,409	3,800	3,921	3,349
8ª	18/05/2018	1,411	3,791	3,687	3,839		1,406	3,780	3,896	3,325
10ª	01/06/2018	1,416	3,808	3,702	3,858		1,421	3,804	3,928	3,359

CTL₁

Tempo	Data	Hidróxido de Cálcio					Sulfato de Sódio			
		Barra	1	3	5		Barra	2	4	6
Leitura 0	23/03/2018	1,396	3,539	2,743	3,440		1,397	3,256	3,517	3,520
2ª	06/04/2018	1,409	3,530	2,733	3,434		1,411	3,253	3,513	3,515
4ª	20/04/2018	1,413	3,534	2,733	3,433		1,408	3,257	3,517	3,517
6ª	03/05/2018	1,413	3,539	2,740	3,439		1,411	3,269	3,528	3,528
8ª	18/05/2018	1,408	3,525	2,720	3,423		1,408	3,255	3,516	3,515
10ª	01/06/2018	1,413	3,537	2,737	3,439		1,413	3,279	3,538	3,537

CTL₂

Tempo	Data	Hidróxido de Cálcio					Sulfato de Sódio			
		Barra	1	3	5		Barra	2	4	6
Leitura 0	11/04/2018	1,428	3,431	3,421	3,521		1,421	3,433	3,219	3,412
2ª	24/04/2018	1,409	3,407	3,395	3,488		1,412	3,416	3,193	3,383
4ª	09/05/2018	1,411	3,408	3,396	3,492		1,407	3,418	3,206	3,400
6ª	23/05/2018	1,417	3,409	3,390	3,492		1,409	3,424	3,209	3,402
8ª	06/06/2018	1,417	3,410	3,400	3,501		1,415	3,441	3,228	3,425
10ª	20/06/2018	1,408	3,399	3,387	3,483		1,409	3,428	3,214	3,406

Anexo G: EXPANSÕES DEVIDO A ASR

CTL₁

Dia	Provete	Leitura média (mm)	Diferença com a leitura 0	Expansão (%)	Expansão média (%)
2 (leitura 0)	A	-4,81	0	0	0
	B	-4,6728	0	0	
	C	-5,2298	0	0	
4	A	-4,7933	0,0167	0,007	0,01
	B	-4,6565	0,0163	0,007	
	C	-5,2228	0,007	0,003	
9	A	-4,7303	0,0797	0,032	0,03
	B	-4,6118	0,061	0,024	
	C	-5,1745	0,0553	0,022	
13	A	-4,6985	0,1115	0,045	0,04
	B	-4,564	0,1088	0,044	
	C	-5,1303	0,0995	0,04	
16	A	-4,607	0,203	0,081	0,09
	B	-4,4398	0,233	0,093	
	C	-4,997	0,2328	0,093	
22	A	-4,4133	0,3967	0,159	0,16
	B	-4,281	0,3918	0,157	
	C	-4,848	0,3818	0,153	
28	A	-4,3598	0,4502	0,18	0,17
	B	-4,2428	0,43	0,172	
	C	-4,7993	0,4305	0,172	

CTL₂

Dia	Data	Hora	Provete	Leituras (mm)			
				Fases			
				1	2	3	4
2 (leitura 0)	7.3.18	15h10	A	-4,798	-4,808	-4,812	-4,810
			B	-4,957	-4,961	-4,960	-4,963
			C	-4,670	-4,671	-4,677	-4,682
4	9.3.18	15h05	A	-4,800	-4,794	-4,819	-4,809
			B	-4,928	-4,922	-4,921	-4,924
			C	-4,665	-4,668	-4,675	-4,678
8	13.3.18	15h05	A	-4,729	-4,741	-4,744	-4,749
			B	-4,898	-4,901	-4,902	-4,904
			C	-4,603	-4,602	-4,609	-4,614
11	16.3.18	14h10	A	-4,667	-4,670	-4,667	-4,663
			B	-4,820	-4,819	-4,821	-4,824
			C	-4,531	-4,527	-4,527	-4,532
16	21.3.18	15h15	A	-4,557	-4,567	-4,564	-4,568
			B	-4,738	-4,739	-4,738	-4,568
			C	-4,437	-4,438	-4,444	-4,449
22	27.3.18	15h00	A	-4,415	-4,409	-4,401	-4,411
			B	-4,589	-4,591	-4,591	-4,595
			C	-4,286	-4,286	-4,292	-4,295
28	24.18	15h05	A	-4,308	-4,311	-4,283	-4,296
			B	-4,476	-4,478	-4,478	-4,482
			C	-4,167	-4,166	-4,172	-4,176

10%GPBA

Dia	Data	Hora	Provete	Leituras (mm)			
				Fases			
				1	2	3	4
2 (leitura 0)	7.3.18	15h20	A	-4,635	-4,646	-4,644	-4,640
			B	-5,197	-5,203	-5,202	-5,207
			C	-4,876	-4,869	-4,872	-4,882
4	9.3.18	15h15	A	-4,636	-4,649	-4,648	-4,645
			B	-5,204	-5,210	-5,210	-5,216
			C	-4,886	-4,872	-4,861	-4,885
8	13.3.18	15h10	A	-4,585	-4,596	-4,595	-4,591
			B	-5,152	-5,157	-5,156	-5,160
			C	-4,830	-4,815	-4,821	-4,833
11	16.3.18	14h15	A	-4,554	-4,565	-4,564	-4,560
			B	-5,121	-5,126	-5,126	-5,129
			C	-4,801	-4,795	-4,796	-4,803
16	21.3.18	15h10	A	-4,546	-4,567	-4,566	-4,552
			B	-5,115	-5,121	-5,120	-5,123
			C	-4,790	-4,781	-4,770	-4,780
22	27.3.18	15h05	A	-4,516	-4,525	-4,525	-4,521
			B	-5,082	-5,086	-5,086	-5,089
			C	-4,757	-4,740	-4,742	-4,746
28	24.18	15h10	A	-4,512	-4,522	-4,523	-4,518
			B	-5,080	-5,085	-5,085	-5,088
			C	-4,780	-4,750	-4,744	-4,758

10%GGPBA

Dia	Data	Hora	Provete	Leituras (mm)			
				Fases			
				1	2	3	4
2 (leitura 0)	16.3.18	14h25	A	-5,255	-5,257	-5,261	-5,262
			B	-4,418	-4,415	-4,421	-4,420
			C	-4,563	-4,563	-4,565	-4,570
7	20.3.18	15h10	A	-5,256	-5,261	-5,258	-5,258
			B	-4,406	-4,392	-4,398	-4,398
			C	-4,552	-4,551	-4,552	-4,557
9	22.3.18	15h10	A	-5,256	-5,261	-5,257	-5,257
			B	-4,395	-4,391	-4,397	-4,403
			C	-4,542	-4,543	-4,546	-4,550
13	26.3.18	15h10	A	-5,204	-5,210	-5,205	-5,204
			B	-4,365	-4,356	-4,364	-4,370
			C	-4,513	-4,512	-4,515	-4,511
16	29.3.18	15h05	A	-5,216	-5,223	-5,219	-5,219
			B	-4,370	-4,362	-4,358	-4,371
			C	-4,509	-4,509	-4,484	-4,518
22	4.4.18	15h00	A	-5,197	-5,202	-5,199	-5,198
			B	-4,354	-4,337	-4,347	-4,348
			C	-4,490	-4,455	-4,459	-4,492
28	10.4.18	15h10	A	-5,216	-5,223	-5,218	-5,219
			B	-4,377	-4,369	-4,366	-4,377
			C	-4,552	-4,558	-4,553	-4,554

Anexo H: RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

t₇₀₀ GPBA

Referência	Data de Fabrico	Idade (dias)	Resistência à flexão R_f (MPa)	Resistência à flexão média (MPa)	Resistência à compressão R_c (MPa)		Resistência à compressão média R_m (MPa)
GPBA	15-05-2018	7	6,6	6,2	40,8	40,9	40,8
700°C			6,3		41,4	40,6	
7d			5,6		40,6	40,3	
GPBA	24-04-2018	28	7,0	7,1	49,1	49,2	49,9
700°C			7,0		50,6	50,3	
7d			7,3		49,8	50,3	

CTL₁

Referência	Data de Fabrico	Idade (dias)	Resistência à flexão R_f (MPa)	Resistência à flexão média (MPa)	Resistência à compressão R_c (MPa)		Resistência à compressão média R_m (MPa)
1	28-02-2018	7	6,6	6,6	47,8	46,6	47,5
2			6,6		47,8	48,0	
3			6,6		48,3	46,3	
4	27-02-2018	28	7,5	7,8	57,7	59,8	58,1
5			8,4		55,9	58,2	
6			7,5		58,9	58,3	
7	20-02-2018	56	7,5	7,6	65,3	65,0	64,6
8			7,7		64,2	64,3	
9			7,7		65,2	63,3	
0	20-02-2018	84	8,0	8	65,8	62,6	64,0
CTL1			8,2		64,4	64,2	
84d			7,7		64,4	62,8	

CTL₂

Referência	Data de Fabrico	Idade (dias)	Resistência à flexão R_f (MPa)	Resistência à flexão média (MPa)	Resistência à compressão R_c (MPa)		Resistência à compressão média R_m (MPa)
1	28-02-2018	7	7,0	6,8	48,8	48,0	48,4
2			7,0		47,5	48,6	
3			6,3		48,8	48,4	
4	27-02-2018	28	7,3	7,5	58,6	59,6	58,0
5			7,7		56,6	57,8	
6			7,5		58,1	57,5	
7	20-02-2018	56	8,0	8	62,5	61,1	63,4
8			8,0		63,9	64,4	
9			8,0		65,2	63,5	
0	20-02-2018	43235	8,2	7,9	68,8	66,6	67,0
CTL2			7,3		66,8	66,3	
84d			8,2		66,1	67,4	

10%GPBA

Referência	Data de Fabrico	Idade (dias)	Resistência à flexão R_f (MPa)	Resistência à flexão média (MPa)	Resistência à compressão R_c (MPa)		Resistência à compressão média R_m (MPa)
1	28-02-2018	7	3,8	3,9	21,1	20,4	20,4
2			4,0		20,6	20,1	
3			4,0		20,1	20,2	
4	27-02-2018	28	4,5	4,2	25,8	25,4	25,1
5			4,0		25,4	24,5	
6			4,2		24,5	24,9	
7	20-02-2018	56	4,7	4,7	27,1	26,3	26,4
8			4,5		27,1	26,4	
9			4,9		26,3	25,4	
0	20-02-2018	84	5,2	4,9	28,9	28,1	28,1
GPBA			4,7		27,3	28,6	
84d			4,7		28,3	27,1	

10%GGPBA

Referência	Data de Fabrico	Idade (dias)	Resistência à flexão R_f (MPa)	Resistência à flexão média (MPa)	Resistência à compressão R_c (MPa)		Resistência à compressão média R_m (MPa)
1	28-02-2018	7	3,5	3,4	18,2	16,1	17,0
2			3,5		17,9	16,3	
3			3,3		15,9	17,6	
4	27-02-2018	28	3,8	3,9	20,1	19,3	20,5
5			4,0		20,4	19,9	
6			3,8		22,3	20,9	
7	20-02-2018	56	4,2	4,4	24,1	24,0	23,8
8			4,5		22,9	24,4	
9			4,5		23,8	23,6	
0	20-02-2018	84	4,7	4,5	26,8	26,1	25,8
GGPBA			4,5		26,0	25,2	
84d			4,2		25,6	25,2	

