



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

NUNO JOÃO PEREIRA DE BRITO

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Trabalho final de mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Área de Especialização de Edificações

Júri:

Presidente:

Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Vogais:

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa

Doutora, Maria Sofia Ribeiro

Doutora, Maria da Graça Dias Alfaro Lopes

Licenciado, José Manuel Domingos Costa

Fevereiro 2013

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

RESUMO

Na presente dissertação, o trabalho desenvolvido teve como objetivo, a avaliação de alguns parâmetros de durabilidade de argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC (do inglês "*Fluid Catalytic Cracking*") para serem utilizadas na reparação de estruturas de betão. O catalisador exausto de FCC é um resíduo da indústria petrolífera e o utilizado neste estudo é proveniente da refinaria da Petrogal, S.A. em Sines.

A presente investigação baseou-se na preparação, e avaliação de propriedades, de duas séries distintas de argamassas: a série que se denominou "*RAS*" e a série que se denominou "*Durabilidade*", nas quais se substituiu, parcialmente entre 5, 10 e 15%, em massa de cimento por resíduo exausto de FCC. As argamassas de ambas as séries diferenciam-se entre si, sobretudo, pela utilização de areia reativa nas argamassas da série *RAS* e de areia inerte no caso das argamassas da série *Durabilidade*.

Nas argamassas estudadas foram realizados ensaios no estado fresco e ensaios no estado endurecido. Os ensaios no estado fresco incluíram a determinação da consistência por espalhamento, da massa volúmica e do teor de ar. Nos ensaios no estado endurecido foram avaliadas, no caso das argamassas da série *RAS* a extensão da reação álcalis-sílica e no caso das argamassas da série *Durabilidade* as resistências mecânicas - à flexão e à compressão, a resistência à carbonatação acelerada, o módulo de elasticidade à compressão, a absorção capilar, a permeabilidade ao oxigénio, a difusão de cloretos em regime não estacionário.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação demonstrou que a incorporação de catalisador exausto de FCC, em argamassas à base de cimento, minimiza o efeito de expansão das reações álcalis-sílica, bem como contribui para reduzir a absorção capilar e coeficiente de difusão de cloretos. No entanto, este resíduo quando incorporados em argamassas contribui para a diminuição da resistência à carbonatação acelerada e para o aumento da permeabilidade ao oxigénio.

Palavra-chave: Argamassa de Reparação Estrutural; Materiais Pozolânicos/ Pozolana; catalisador exausto de FCC; Durabilidade; Reação Álcalis-Sílica.

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

ABSTRACT

The aim of this research, is the evaluation of the effect that the exhaust Fluid Catalytic *Cracking* (FCC) – used as a partial cement replacement – has on some durability parameters, in order to be used as a structure repair mortar. The exhausted catalyst FCC used in this research, is a residue that is produced in an oil refinery named Petrogal, S.A. located in Sines.

The current research, was based on the preparation and evaluation of the properties of two different series of mortars: serie “*RAS*” and serie “*Durabilidade*”, in which one of this series was replaced 5, 10 and 15% of cement by exhausted catalyst FCC. The main difference between *RAS* and *Durabilidade* series was the sand used, respectively reactive sand (used in *RAS* series) and non-reactive sand (used in *Durabilidade* series).

The studied mortars were tested in two different states, fresh and hardened. The tests performed on the fresh mortars whose objective was the evaluation of the flow, density and air content for both series. In the hardened state alkali-silica reaction was tested only in *RAS* series while in *Durabilidade* series the compression and flexural strenght, elasticity modulus, water absorption capilarity, non steady chloride diffusion, carbonation resistance and oxygen permeability were tested.

This essay showed that the FCC when used as partial cement replacement in cement based mortars, minimizes the expansion due to alkali-silica reaction. It reduces aswell the capilarity absorption and the non steady state chloride diffusion. However the FCC incorporation also reduces the resistance to carbonation and increases the oxygen permeability.

Keyword: Structural Repair Mortar; pozzolanic materials / Pozzolana; FCC; Durability; Alkali-Silica Reaction.

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento e realização desta dissertação só foi possível, graças ao apoio de várias pessoas, às quais quero expressar o meu agradecimento.

À Orientadora, Doutora Carla Maria Duarte da Silva e Costa agradeço não só os conhecimentos transmitidos como também o rigor e espírito crítico inculcados, valiosos para a realização e desenvolvimento deste trabalho. Gostaria também, de agradecer todo o apoio e disponibilidade sempre demonstrados, desde o momento da escolha do tema até à revisão atenta desta dissertação.

À Doutora Maria Sofia Ribeiro, do LNEC, coorientadora desta dissertação, expresso o meu apreço e agradecimento pela orientação, sugestões e comentários ao longo da investigação laboratorial realizada.

Agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), os recursos disponibilizados que permitiram a concretização desta dissertação, através do Projeto de Investigação (Ref.^a PTDC/ECM/113115 /2009) “ECO-Zement: Reutilização do Resíduo de “*Cracking*” Catalítico em Leito Fluidizado da Refinação de Petróleo em Materiais de Base Cimentícia” e através do projeto no domínio da Engenharia Civil e Minas (Ref.^a PTDC/ECM/101810 /2008) denominado “Argamassas Cimentícias Modificadas com Polímeros para Reparação de Estruturas de Betão Armado”.

Ao LNEC pela cedência das instalações e equipamentos. Ao Eng^o Manuel Vieira, ao Eng^o André Monteiro do LNEC pelas facilidades concedidas para o desenvolvimento dos ensaios e ao Eng^o João Feiteira, pelo apoio na realização de algumas tarefas e ensaios. Ao João Balsinha, ao Rui Nogueira, ao Victor Fialho, ao Pedro Amaral, ao António Ferreira, ao Gil Rosa, ao Hélder Rodrigues, Olivier Pinheiro, à Daniela Duarte e à Fernanda Lopes, técnicos do Núcleo de Betões, pela amizade, ajuda, sugestões e disponibilidade sempre demonstrada durante as tarefas e os ensaios realizados.

À Daniela, à Inês e à Cátia pela amizade, pelo companheirismo e espírito de entreajuda ao longo da elaboração desta dissertação.

Não posso deixar de agradecer aos meus colegas de curso que ao longo do meu percurso académico demonstraram espírito de entreajuda e camaradagem – à Qiong Zhou, ao Johnny, ao Tiago, ao Zeca, ao Lucena, ao Pedro e ao Emanuel.

A toda a minha Família pelo incentivo e apoio sempre demonstrados, uma palavra de agradecimento muito especial ao meu Avô, ao meu Tio, e ao Alexandre.

À Marta pelo carinho, compreensão, auxílio e pelas horas que passou a apoiar-me e encorajar-me nas alturas mais difíceis.

Aos meus pais pelo amor, dedicação, estímulo e apoio incondicional não só durante este projeto e percurso académico, mas em todos os momentos da minha vida. Sem o seu apoio nunca teria tido a hipótese de estar a terminar um curso superior.

A todos, o meu obrigado.

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS.....	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e justificação do tema	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Organização da dissertação	2
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1 Considerações Iniciais.....	5
2.2 Fatores que afetam a durabilidade dos materiais à base de cimento.....	5
2.2.1 Fatores que condicionam a durabilidade dos materiais à base de cimento	
6	
2.2.1.1 Razão água/cimento.....	6
2.2.1.2 Resistência mecânica.....	6
2.2.1.3 Absorção capilar.....	7
2.2.1.4 Permeabilidade ao oxigénio.....	7
2.2.2 Fatores que degradam os materiais à base de cimento.....	8
2.2.2.1 Causas Naturais	8
2.2.2.2 Corrosão das armaduras	8
2.2.2.3 Reação álcalis-sílica.....	10
2.3 Formas de contribuir para a durabilidade dos materiais.....	10
2.4 Argamassas de reparação.....	11
2.4.1 Cimento	13

2.4.2	Hidratação do cimento.....	14
2.5	Influência das pozolanas nas características das argamassas	15
2.5.1	Catalisador exausto FCC.....	17
3	CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	25
3.1	Considerações iniciais	25
3.2	Materiais.....	27
3.2.1	Cimento	27
3.2.2	Catalisador exausto FCC.....	27
3.2.3	Areia.....	28
3.2.3.1	Areia utilizada nas argamassas da série <i>RAS</i>	28
3.2.3.2	Areia utilizada nas argamassas da série <i>Durabilidade</i>	30
3.2.4	Água.....	30
3.2.5	Superplastificante	30
3.3	Preparação de argamassas.....	31
3.3.1	Mistura das argamassas da série <i>RAS</i>	31
3.3.1.1	Preparação de argamassas da série <i>RAS</i>	32
3.3.1.2	Moldagem, compactação, desmoldagem e identificação de argamassas da série <i>RAS</i>	33
3.3.2	Mistura de argamassas da série <i>Durabilidade</i>	34
3.3.2.1	Preparação de argamassas da série <i>Durabilidade</i>	35
3.3.2.2	Moldagem, compactação, desmoldagem e identificação das argamassas da série <i>Durabilidade</i>	36
3.4	Ensaio no estado fresco.....	39
3.4.1	Consistência por espalhamento.....	40
3.4.1.1	Ensaio de espalhamento de acordo com a ASTM C1437-07	40
3.4.1.2	Ensaio de espalhamento de acordo com a ASTM C230-90.....	41
3.4.2	Massa volúmica.....	41
3.4.3	Teor de ar.....	42
3.5	Ensaio no estado endurecido.....	44

3.5.1	Série de argamassas <i>RAS</i> – Reação álcalis-sílica acelerada	44
3.5.2	Série de argamassas <i>Durabilidade</i>	47
3.5.2.1	Resistência mecânica à flexão e à compressão	47
3.5.2.2	Determinação do módulo de elasticidade à compressão	48
3.5.2.3	Absorção capilar	51
3.5.2.4	Difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH)	52
3.5.2.5	Resistência à carbonatação acelerada	56
3.5.2.6	Permeabilidade ao oxigênio	58
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL	63
4.1	Considerações iniciais	63
4.2	Ensaio no estado fresco	63
4.2.1	Consistência por espalhamento	63
4.2.1.1	Consistência por espalhamento da série de argamassas <i>RAS</i>	64
4.2.1.2	Consistência por espalhamento da série de argamassas <i>Durabilidade</i>	66
4.2.2	Massa volúmica	67
4.2.2.1	Massa volúmica da série de argamassas <i>RAS</i>	67
4.2.2.2	Massa volúmica série de argamassas <i>Durabilidade</i>	68
4.2.3	Teor de ar	69
4.2.3.1	Teor de ar da série <i>RAS</i>	69
4.2.3.2	Teor de ar da série de argamassas <i>Durabilidade</i>	69
4.3	Análise de resultados dos ensaios no estado endurecido	70
4.3.1	Ensaio da série de argamassas <i>RAS</i> - ensaio de reação álcalis-sílica acelerada	70
4.3.2	Ensaio da série de argamassas <i>Durabilidade</i>	73
4.3.2.1	Ensaio de resistência mecânica à flexão e à compressão	73
4.3.2.2	Ensaio de determinação do módulo de elasticidade à compressão	78
4.3.2.3	Ensaio de absorção capilar	79
4.3.2.4	Ensaio de difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH) ..	81
4.3.2.5	Ensaio de resistência à carbonatação acelerada	82

4.3.2.6	Ensaio de permeabilidade ao oxigénio	84
5	CONCLUSÕES.....	87
5.1	Conclusões gerais	87
5.2	Recomendação de propostas de estudos futuros	91
6	BIBLIOGRAFIA.....	93
	ANEXOS.....	106
	Anexo A – Planeamento das atividades experimentais.....	i
	Anexo B – Ficha de Materiais	1
	Anexo C - Consistência por espalhamento	ix
	Anexos D - Reação álcalis-sílica.....	xv
	Anexos E – Resultados dos ensaios de resistência mecânica	xxxi
	Anexos F – Resultados dos ensaios de absorção capilar	xxxv
	Anexos G – Resultados dos ensaios do módulo de elasticidade	xli
	Anexo H – Resultados dos ensaios da difusão de cloretos em regime não estacionário	xlvii
	Anexos I – Resultados dos ensaios de resistência a carbonatação acelerada.....	li
	Anexos J – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao oxigénio	lix

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Requisitos de desempenho de produtos de reparação estrutural e não estrutural (norma NP EN 1504-3).....	12
Tabela 2.2 - Princípios e métodos para a protecção e reparação de estruturas de betão norma NP EN 1504-9.....	13
Tabela 2.3 - Resistência à degradação de materiais à base de cimento com substituição parcial de cimento por pozolanas	17
Tabela 2.4 - Ensaio de resistência mecânica obtida em argamassas pozolânicas com substituição de 10% e 20% cimento e com misturas binárias de sílica de fumo (SF), cinzas de casca de arroz (RHS), resíduo de <i>cracking</i> catalítico em leito fluidizado (FCC – FC3R) com cinzas volantes (FA)	19
Tabela 3.1- Sistematização dos ensaios de avaliação do efeito da incorporação de catalisador exausto de FCC em argamassas cimentícias	25
Tabela 3.2 - Composição química e propriedades físicas do catalisador exausto FCC	27
Tabela 3.3 - Fração granulométrica retida e percentagem mássica necessária para a preparação da argamassa da série de argamassas <i>RAS</i>	29
Tabela 3.4 - Designação e composição das argamassas da série <i>RAS</i>	32
Tabela 3.5 – Composição das argamassas da série <i>RAS</i> em kg/m ³	32
Tabela 3.6 - Designação e composição das argamassas da série <i>Durabilidade</i>	34
Tabela 3.7 - Composição das argamassas da série <i>Durabilidade</i> em kg/m ³	35
Tabela 4.1- Índice de atividade, com base na resistência mecânica à flexão, da série de argamassas <i>Durabilidade</i>	75
Tabela 4.2- Índice de atividade, com base na resistência mecânica à compressão, da série <i>Durabilidade</i>	77
Tabela 5.1 - Resultados obtidos nos ensaios de estado fresco e endurecido para as argamassas estudadas das séries - <i>RAS</i> e <i>Durabilidade</i> , requisitos das propriedades definidas pela norma NP EN 1504-03 e classificação das argamassas.	90

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Difusão de cloretos em regime não estacionário em argamassas incorporadas com 5%, 10%, 15% e 20% FCC com razão a/c não constantes e com adição de SP apenas para razão a/c baixas (0,3 a 0,4).	21
Figura 2.2 - Profundidade de carbonatação aos 21 dias para uma concentração de 100% CO ₂	22
Figura 3.2 - Obtenção do agregado necessário para a preparação das argamassas da série RAS. a) Britadeira utilizada na moagem do seixo brita n°1 FB. b) Fração granulométrica do agregado 2,36 mm do agregado retido no peneiro n° 8. c) Fração granulométrica do agregado 1,18 mm do agregado retido no peneiro n° 16. d) Fração granulométrica do agregado 600 µm do agregado retido no peneiro n° 30. e) Fração granulométrica do agregado 300 µm do agregado retido no peneiro n° 8. f) Fração granulométrica do agregado 150 µm do agregado retido no peneiro n° 100.	29
Figura 3.3- Misturadora mecânica utilizada na preparação das argamassas da série RAS e Durabilidade.	33
Figura 3.4 - Moldagem de provetes prismáticos (25x25x250 mm) das argamassas da série RAS, compactação da primeira camada de argamassa com o auxílio de um pilão de plástico.	33
Figura 3.5 - Moldagem de provetes prismáticos (40x40x160 mm) das argamassas da série Durabilidade no compactador automático. a) Compactador automático com caixa aberta. b) Compactador automático com caixa fechada durante a compactação.....	36
Figura 3.6 - Condicionamento e cura dos provetes das argamassas da série Durabilidade e da série RAS. a) Moldes (40x40x160 mm e 25x25x250 mm) na câmara de cura. b) Imersão dos provetes (40x40x160 mm) da série de argamassas Durabilidade.	37
Figura 3.7 - Moldagem de provetes cilíndricos (25mm de espessura e 100 mm de diâmetro, e 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro) das argamassas da série Durabilidade. a) Mesa vibratória com o molde cilíndrico. b) Para os provetes cilíndricos com 25 mm de espessura a medição do enchimento da altura de argamassa é feita com o auxílio de uma bitola. c) Alisamento da superfície dos provetes de 25 mm de espessura com recurso a uma peça de madeira.....	38
Figura 3.8 - Condicionamento e cura dos provetes da série de argamassas Durabilidade. a) Cura dos provetes cilíndricos, nos moldes, coberta com o plástico e	

ripas. b) Imersão dos provetes (25 mm de espessura e 100 de diâmetro e 50 mm de diâmetro) da série de argamassas *Durabilidade*. 38

Figura 3.9 - Ensaio de consistência por espalhamento (estado fresco) para as argamassas da série *Durabilidade* e da série *RAS*. a) Molde tronco-cónico preenchido com argamassa. b) Medição do espalhamento da argamassa, numa das três direcções, com auxílio de um paquímetro. 41

Figura 3.10 - Ensaio de determinação da massa volúmica (estado fresco) para as argamassas da série *Durabilidade* e da série *RAS*. a) Recipiente utilizado na medição da massa volúmica, b) Placa de vidro utilizada na regularização da superfície da argamassa no recipiente. c) Pesagem do recipiente. d) Regularização da superfície da argamassa. 42

Figura 3.11 - Ensaio de determinação do teor de ar (estado fresco) das argamassas da série *Durabilidade* e da série *RAS*. a) Equipamento utilizado na determinação do teor de ar - aérometro. b) Martelo de borracha utilizado na compactação. c) Regularização da superfície da argamassa no recipiente, recorrendo a uma placa de vidro. 43

Figura 3.12 - Ensaio de determinação da Reação Álcali-silica acelerado das argamassas da série *RAS*. a) Deflectómetro utilizado na medição de comprimento do provete. b) Acondicionamento dos recipientes na estufa. c) Limpeza do excesso da solução de hidróxido de sódio (NaOH), antes de se proceder à medição. d) Recipientes com os provetes imersos em, hidróxido de sódio (NaOH). 45

Figura 3.13 - Plano de leituras sistematizado para o ensaio das argamassas da série *RAS* de acordo com a ASTM C1260-07. 46

Figura 3.14 - Ensaio de determinação da resistência mecânica das argamassas da série *Durabilidade*. a) Máquina de ensaio de resistência á compressão e flexão. b) Determinação da resistência à flexão. c) Determinação da resistência à compressão. 48

Figura 3.15 – Ensaio de módulo de elasticidade das argamassas da série *Durabilidade*. a) Painel de controlo pertencente à máquina de ensaios de resistência mecânica a qual possibilita a programação do nº de ciclos e respetivas forças de compressão. b) HP 75000 que permite registar as deformações. c) Tensores que permitem a leitura das deformações. 50

Figura 3.16 – Ensaio de determinação da absorção capilar das argamassas da série *Durabilidade*. a) Colocação dos provetes no tabuleiro sob as varetas de vidro. b) Pesagem dos provetes após ser retirado o excesso de água com papel absorvente.. 51

Figura 3.17 – Ensaio de difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH) das argamassas da série *Durabilidade*. a) Provetes no exsecador em vácuo imersos numa solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) . b) Colocação do provete cilíndrico e braçadeira na manga.c) Manga com duas braçadeiras de aço inoxidável. d) Suporte de plástico no interior do reservatório catódico. e) Reservatórios catódicos. f) Mangas colocados sobre o suporte de plástico no interior do reservatório catódico. g) Mangas com os provetes no seu interior, que se encontram no reservatório catódico com os ânodos já colocado. h) Termómetro colocado no interior da manga por cima do ânodo. i) Fonte de alimentação utilizada no ensaio da difusão de cloretos em regime não estacionário. j) Observação dos cloretos na superfície do provete. k) Colocação do provete na prensa. l) Provelte pulverizado com a solução de nitrato de prata. m) Medição da profundidade de cloretos recorrendo a utilização de um paquímetro digital. 55

Figura 3.18 - Plano de leituras sistematizado para o ensaio de resistência à carbonatação acelerada das argamassas da série *Durabilidade*. 57

Figura 3.19 – Ensaio de determinação da resistência à carbonatação acelerada das argamassas da série *Durabilidade*. a) Secagem dos provetes apoiados em espaçadores de plástico rígido evitando que a face inferior esteja em contato com a bancada sobre papel absorvente evitando que haja água sobre a bancada. b) Câmara de carbonatação. c) Marcação da área a quebrar pela prensa. d) Prensa utilizada na quebra das extremidades dos provetes. e) Extremidade dos provetes quebrados não pulverizados com fenolftaleína. f) Tabuleiro com os provetes preparados para inserir na câmara de carbonatação. g) Extremidade dos provetes quebrados pulverizados com fenolftaleína. h) Medição da profundidade de carbonatação com auxílio de um paquímetro digital. 58

Figura 3.20 – Ensaio de permeabilidade ao oxigénio das argamassas da série *Durabilidade*. a) Colocação da fita adesiva em redor do provete. b) Colocação da película plástica a envolver o provete. c) Provelte envolvido em película plástica. d) Colocação dos provetes envolvidos em película plástica no interior do recipiente. e) Recipientes com os provetes na estufa. f) Câmara de permeabilidade ao Oxigénio. g) Equipamento utilizado na medição da permeabilidade – Medidor de bolha de sabão. 60

Figura 4.1 - Consistência por espalhamento (D_m) de acordo com a ASTM C1437-07 da série de argamassas *RAS*. A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a consistência obtida por espalhamento em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC. 64

Figura 4.2 - Consistência por espalhamento (D_m) de acordo com a ASTM C230-90 da série de argamassa <i>RAS</i> . A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a consistência obtida por espalhamento em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.....	65
Figura 4.3 - Consistência por espalhamento (D_m) de acordo com a ASTM 1437-07 da série de argamassas <i>Durabilidade</i> . A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a consistência obtida por espalhamento em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.....	66
Figura 4.4 - Massa volúmica (ρ) da série de argamassas <i>RAS</i> . A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a massa volúmica em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.....	67
Figura 4.5 - Massa volúmica (ρ) da série de argamassas <i>Durabilidade</i> . A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a massa volúmica em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.....	68
Figura 4.6 - Teor de ar da série de argamassas <i>RAS</i>	69
Figura 4.7 - Teor de ar da série de argamassas <i>Durabilidade</i>	70
Figura 4.8 – Expansão dos provetes, em solução de 1N de NaOH da série de argamassas <i>RAS</i>	71
Figura 4.9 - Aumento de massa dos provetes da série de argamassas <i>RAS</i>	72
Figura 4.10 – Comparação entre a expansão e o aumento de massa dos provetes aos 30 dias, da série de argamassas <i>RAS</i>	73
Figura 4.11- Resistência mecânica à flexão, da série de argamassas <i>Durabilidade</i> . ..	74
Figura 4.12- Resistência mecânica à compressão, da série de argamassas <i>Durabilidade</i> . ..	76
Figura 4.13- Módulo de elasticidade (E) à compressão aos 28 dias de idade das argamassas, da série de argamassas <i>Durabilidade</i> . A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre o módulo de elasticidade à compressão em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.....	78

Figura 4.14- Coeficiente de absorção capilar, da série de argamassas <i>Durabilidade</i> . As retas de regressão linear e as respectivas expressões das equações representadas correspondem à correlação - R^2 - verificada entre a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo decorrido.	80
Figura 4.15- Coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH), da série de argamassas <i>Durabilidade</i> . A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre o coeficiente de difusão de cloretos em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.	81
Figura 4.16- Resistência à carbonatação acelerada, da série de argamassas <i>Durabilidade</i>	83
Figura 4.17- Permeabilidade ao oxigénio aos 72 dias da série <i>Durabilidade</i> . A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a permeabilidade ao oxigénio em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.	84

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Siglas	
a/c	Razão água/cimento
ASTM (Normas)	Norma Americana publicada pela “ <i>American Society for Testing and Materials</i> ”
BM	Base de medida
CEM	Cimentos correntes
CEN	Areia normalizada CEN certificada
CM	Argamassas cimentícias (do inglês <i>cement mortars</i>)
CTH	Método utilizado no ensaio de avaliação da difusão de cloretos (do inglês <i>Chloride Transport in Concrete</i>)
d.d.p	Diferença de potencial elétrico
D _m	Diâmetro médio de espalhamento
DRX	Difração por raios X (do inglês <i>x-ray diffraction</i>)
E	Módulo de elasticidade (GPa)
EN (Norma)	Norma Europeia (do inglês <i>European norm</i>)
FA	Cinzas Volantes (do inglês <i>fly ash</i>)
FCC	Catalisador do “ <i>cracking</i> ” catalítico em leito fluidizado
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
Fs	Sal de Friedel (do inglês <i>Friedel salt</i>)
GGBS	Escória de alto-forno (do inglês <i>ground granulated blast furnace slag</i>)
HR	Humidade relativa
I	Captação de água por unidade de área (kg/m ²)
IA	Índice de atividade pozolânica
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
K _{oxig}	Coeficiente de permeabilidade ao oxigénio
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia de Lisboa
MEV	Microscópio electrónico de varrimento
MK	Metacaulino (do inglês <i>metakaolin</i>)
MZ	Zeólito Modificado (do inglês <i>modified zeolite</i>)
NP (Norma)	Norma Portuguesa
PIM	Porometria por Intrusão de Mercúrio
RAS	Reações álcalis-sílica
RHA	Cinzas de casca de arroz (do inglês <i>rice husk ash</i>)

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

SCM	Materiais Cimentícios Suplementares
SF	Silica de Fumo (do inglês <i>silica fume</i>)
SP	Superplastificante
TGA	Análise Termogravimétrica (do inglês <i>thermogravimetric analyses</i>)
W	Massa total do provete (g)
ZN	Zeólito Natural
$\Delta\sigma$	Variação de tensão aplicada na determinação do módulo de elasticidade (MPa ou N/mm ²)
ρ	Massa volúmica (g/cm ³)
σ	Tensão (MPa ou N/mm ²)

Nomenclatura química usada no domínio dos cimentos

C – S – H	Silicatos de cálcio hidratados
C – A – H	Aluminatos de cálcio hidratados
C – A – S – H	Aluminossilicatos de cálcio hidratados
S – H	Silicatos hidratados
A – H	Aluminatos hidratados
A – S – H	Aluminossilicatos hidratados

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e justificação do tema

As reparações estruturais são uma realidade constante nas empreitadas de construção nacionais, resultado do envelhecimento da estrutura ou de deficiências nesta, ou ainda, da má qualidade na execução. São várias as causas de insucesso observadas em obras de reparação sendo crucial a qualidade do material de reparação utilizado, o controlo da qualidade na aplicação dos materiais de reparação e o conhecimento/manutenção do seu desempenho em serviço.

Nas reparações de estruturas de betão armado são preferencialmente aplicadas argamassas cimentícias (CM), dado serem as mais vantajosas em termos de custos e facilmente compatíveis com o suporte a reparar devido à sua afinidade química e física.

A utilização de materiais pozolânicos na composição de argamassas cimentícias pode traduzir-se numa melhoria das suas propriedades físicas e mecânicas e contribuir para a sua durabilidade, bem como, contribuir para a mitigação do impacte ambiental dos materiais à base de cimento contribuindo para a sustentabilidade. Os materiais pozolânicos têm na sua composição silicatos ou aluminossilicatos amorfos que, embora não apresentem atividade aglomerante, quando em contacto com a água e na presença do hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, reagem formando componentes com propriedades ligantes.

É neste contexto que se pretende avaliar o efeito da incorporação de um resíduo da indústria petrolífera, oriundo da unidade de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado – catalisador exausto de FCC, na durabilidade de argamassas cimentícias de reparação de estruturas de betão. O catalisador exausto de FCC é um aluminossilicato com a estrutura cristalina tridimensional composta por túneis e cavidades que lhe confere elevada área superficial específica [1].

Este estudo está enquadrado pelos projectos de investigação científica e desenvolvimento tecnológico, no domínio da Engenharia Civil e Minas denominados: (i) “ECO-Zement: Reutilização do Resíduo de “*Cracking*” Catalítico em Leito Fluidizado da Refinação de Petróleo em Materiais de Base Cimentícia” (Ref.^a PTDC/ECM/113115 /2009) do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, co-financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia pela empresa Petrogal, S. A e (ii) “Argamassas Cimentícias Modificadas com Polímeros para Reparação de estruturas de Betão

Armado” (Ref.^a PTDC/ECM/101810 /2008) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e que se inclui no estudo de Investigação Programada do PIP 2009-2012 “Sistemas de Inspeção e de Reparação de Estruturas de Betão Armado” do LNEC.

1.2 Objetivo

Este trabalho pretende contribuir para o aumento do conhecimento do efeito da incorporação de um subproduto da indústria petrolífera - catalisador exausto FCC - como substituto parcial de cimento em argamassas cimentícias para aplicação na reparação de estruturas de betão. Neste sentido, pretende-se avaliar o efeito da incorporação de catalisador exausto de FCC nas quer nas propriedades mecânicas quer em parâmetros que se relacionam com a durabilidade de argamassas cimentícias (nomeadamente na absorção de água por capilaridade, na resistência à carbonatação acelerada, na difusão de cloretos em regime não estacionário, na permeabilidade ao oxigénio e na extensão da reação álcalis-sílica prevenção de danos originados pela reação álcalis-sílica).

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos. Os assuntos abordados em cada um deles serão expostos em seguida.

No capítulo 1 – INTRODUÇÃO – é apresentado o enquadramento do tema, descrevem-se os objetivos deste trabalho e expõe-se a organização da dissertação.

O capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA – neste capítulo são descritos os principais constituintes do cimento, a reação de hidratação do mesmo e apresnta-se o estado de arte dos efeitos de incorporação de materiais pozolânicos na durabilidade dos materiais à base de cimento, baseado numa pesquisa bibliográfica.

No capítulo 3 – CAMPANHA EXPERIMENTAL – é descrita a campanha experimental desenvolvida no âmbito da dissertação. Nomeadamente, apresenta-se o plano de ensaios, identificam-se e caracterizam-se os constituintes das argamassas bem como os procedimentos experimentais seguidos no decorrer de cada ensaio.

No capítulo 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL – discutem-se os resultados obtidos na campanha experimental, através da

apresentação de gráficos e quadros, que permitem relacionar os resultados dos diversos ensaios e analisar criticamente os resultados à luz do estado actual do conhecimento.

No último capítulo – CONCLUSÕES – sintetizam-se as conclusões do estudo efetuado e sugerem-se propostas de trabalhos futuros neste domínio.

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Considerações Iniciais

O betão e as argamassas de cimento, quando devidamente prescritos tendo em conta as condições de exposição ambiental onde se inserem, são considerados materiais de elevada durabilidade e espera-se que satisfaçam a vida útil de projeto das estruturas de betão de 50 anos. No entanto, verifica-se que muitos dos edifícios com idade inferior apresentam problemas de degradação, quer a nível dos materiais estruturais quer a nível dos materiais não estruturais. Este facto conduz-nos à procura de melhor qualidade e consequentemente maior durabilidade. A produção de uma argamassa considerada com qualidade está diretamente ligada ao controlo de todos os materiais que entram na sua constituição. O uso inadequado de materiais que não estejam de acordo com as especificações técnicas pré-estabelecidas origina a deterioração das argamassas [2]. Sendo a durabilidade de uma argamassa, a capacidade que esta apresenta de manter os requisitos de projeto em termos de segurança, de funcionalidade e de estética sem custos de manutenção não previstos, esta é condicionada pelas condições de agressividade do meio a que a argamassa se encontra exposta e pelo tipo de solicitações de natureza física e mecânica a que a argamassa vai ser submetida [3]. A utilização de uma argamassa considerada com qualidade tem como consequência uma maior durabilidade [4, 5].

2.2 Fatores que afetam a durabilidade dos materiais à base de cimento

As argamassas apresentam capacidades de moldagem e têm características de resistência que lhes permitem ser uma boa solução estrutural e uma das estratégias para os trabalhos de reparação no setor da construção civil. Os sinais de degradação que uma construção em betão armado pode apresentar são indicativos de que o período de vida útil, dessa mesma construção, se está a aproximar do fim ou, podem ainda, ser indicativos de sinal de degradação numa fase prematura.

A durabilidade de uma argamassa de reparação é afetada por fatores que condicionam os materiais à base de cimento – causas de natureza humana, razão água/cimento (a/c), resistência mecânica, absorção capilar e permeabilidade ao oxigénio, e por fatores que degradam esses mesmos materiais - causas naturais, corrosão das armaduras, difusão de cloretos, carbonatação, reação álcalis-sílica, entre

outros. Dos fatores referidos, descrevem-se com mais detalhe, aqueles que são objeto de avaliação na presente dissertação (secção 2.2.1).

2.2.1 Fatores que condicionam a durabilidade dos materiais à base de cimento

Na degradação de estruturas são evidenciadas as causas de natureza humana que podem estar na origem da degradação das estruturas de materiais à base de cimento e estão presentes em todas as fases de construção: a má conceção do projeto, a má qualidade dos materiais escolhidos a falta de qualidade técnica, a má interpretação dos desenhos, a deficiente execução, entre outras.

2.2.1.1 Razão água/cimento

A razão a/c é outro fator que influência as características dos materiais à base de cimento. A água utilizada na mistura deve ser suficiente para garantir a fluidez necessária à trabalhabilidade da argamassa, mas não deve ser muito elevada para evitar a exsudação durante o processo de cura, caso contrário, provoca um aumento do volume de vazios originando um enfraquecimento da matriz à base de cimento [6, 7, 8, 9, 10] o que poderá levar a um transporte de substâncias endógenas e exógenas que induzem em último caso à degradação.

2.2.1.2 Resistência mecânica

A resistência mecânica de um material à base de cimento no estado endurecido pode ser definida como: a capacidade que este material apresenta para resistir a esforços e a tensões sem atingir a rotura, ou seja, a uma matriz cimentícia densa, corresponde uma resistência mecânica elevada, aumentando assim a durabilidade dos materiais cimentícios.

A resistência mecânica de um material à base de cimento é influenciada por vários fatores entre os quais se destacam [11, 12, 13]:

- Razão a/c – quanto menor for esta razão maior será a resistência mecânica;
- Idade – a resistência mecânica aumenta com a idade do material cimentício, embora este aos 28 dias já tenha adquirido cerca de 75 a 90% da sua resistência total;

- Forma, granulometria e textura dos agregados – agregados com forma angulosa, granulometria reduzida e textura rugosa aumentam a resistência mecânica;
- Tipo de cimento;
- Condição de cura – a cura dos materiais à base de cimento deve efectuar-se sob condições de temperatura e humidade que permitam evitar a perda de água, necessária à hidratação do cimento, evitando patologias que vão reduzindo a resistência mecânica.

2.2.1.3 Absorção capilar

A absorção de água por capilaridade define-se como a capacidade que os materiais porosos têm de absorver água acima do nível que apresenta a superfície líquida em contato com eles.

A absorção capilar é um dos mecanismos de transporte que mais afeta a durabilidade dos materiais à base de cimento, verificando-se que na presença de substâncias endógenas e exógenas, estas podem conduzir à degradação. No transporte por capilaridade, a dimensão dos poros capilares origina forças capilares, entre a superfície da água e as paredes dos poros, causadas pela tensão superficial do líquido que penetra no interior dos poros, que dependem das características do líquido (densidade, viscosidade) e da porosidade da matriz cimentícia. Os poros capilares são os principais responsáveis pela percolação da água e de outros compostos químicos facilitando a ocorrência de reações químicas de degradação, contribuindo assim para a diminuição da durabilidade [14, 15, 16, 17, 18, 19].

2.2.1.4 Permeabilidade ao oxigénio

A permeabilidade ao oxigénio revela a interconetividade dos poros existentes na matriz cimentícia e indica a facilidade com que estes são (ou não) atravessados por mecanismos de transporte de substâncias endógenas e exógenas (gases) nocivas à matriz cimentícia [20, 21, 22]. Relacionando a permeabilidade ao oxigénio com a durabilidade, pelo critério de Lee [23] para betões, estes apresentam três níveis de qualidade – qualidade esta, que está relacionada com o volume de poros existentes na matriz cimentícia e que condiciona a durabilidade, conforme os valores do coeficiente de permeabilidade ao oxigénio, que são os seguintes [24]:

- Abaixo de $10 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ – boa qualidade;
- Entre os 10×10^{-17} e os $30 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ – qualidade moderada;
- Acima de $30 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ – qualidade pobre.

2.2.2 Fatores que degradam os materiais à base de cimento

2.2.2.1 Causas Naturais

As causas naturais que originam a degradação das estruturas à base de betão subdividem-se em: ações físicas, ações químicas e ações biológicas [25].

As ações físicas que resultam em fissuração do betão podem ser resultado de efeitos térmicos, retrações, erosões, desgaste e ciclo gelo-degelo. As ações químicas são originadas por agentes químicos agressivos provenientes do ambiente exterior. As ações biológicas vão deteriorar o betão através da libertação de agentes agressivos [26].

2.2.2.2 Corrosão das armaduras

Numa estrutura, as armaduras encontram-se protegidas contra a corrosão por uma película passiva muito alcalina em que o pH varia entre 12,5 a 13,5. Este fenómeno, denominado por passivação impede a corrosão do aço. Com o ataque dos cloretos ou com o fenómeno da carbonatação, ocorre a destruição desta película (despassivação) verificando-se o decréscimo do valor de pH para 8 a 9,5, iniciando-se o fenómeno de degradação química do material, designado por corrosão [27, 28].

❖ Ação de cloretos

Os iões cloretos em materiais à base de cimento condicionam a corrosão das armaduras, por destruição da película passiva - despassivação. Para que esta ocorra por ação dos iões cloreto, é necessário que estes iões penetrem nos materiais à base de cimento atingindo a armadura com uma concentração superior ao teor crítico em cloretos cujo valor é 0,4% [29].

As origens dos iões cloreto nos materiais à base de cimento podem ser diversas, nomeadamente:

- Uso de aceleradores de presa que contêm cloreto de cálcio (CaCl_2);

- Presença de impurezas nos agregados e na água de amassadura;
- Atmosfera marinha;
- Água do mar;
- Sais de degelo;
- Processos industriais.

Quanto ao modo de como os íons cloreto podem ser encontrados no interior dos materiais à base de cimento, tem-se [30, 31, 32, 33, 34, 35]:

- Quimicamente combinados (cloroaluminatos);
- Fisicamente adsorvidos na superfície dos poros capilares;
- Livres na solução dos poros dos materiais à base de cimento.

❖ Carbonatação

A reação de hidratação do cimento origina um meio muito alcalino, em que o pH tem valores na ordem dos 12,5 a 13,5. Assim, numa estrutura de betão armado as armaduras de aço são envolvidas por uma fina película de óxidos e hidróxidos de ferro – película passiva – que adere fortemente ao aço e que impede a sua corrosão. A carbonatação é um dos processos que contribui para a destruição desta película – consiste na reação do dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera (existente na atmosfera na proporção de 0,03% em volume – 0,5 mg/l de ar) [28] com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (resultante da hidratação do cimento) dos materiais à base de cimento. Esta reação forma carbonato de cálcio (CaCO_3) e reduz o pH para valores inferiores a 9, podendo provocar a destruição da película passiva.

A profundidade de carbonatação é condicionada pela Humidade Relativa (HR). Se o valor da HR for superior a 70%, a presença de água nos poros da matriz cimentícia dificulta a difusão do CO_2 . Se for inferior a 50% a reação química do CO_2 com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ resultante da hidratação do cimento, é dificultada devido à falta da quantidade de água necessária à ocorrência desta reação. O ambiente favorável para que ocorra a carbonatação ocorre para HR entre os 50% e os 70%. Os produtos resultantes das reações de carbonatação podem contribuir para incrementar a resistência à carbonatação, pois diminuem a porosidade da matriz cimentícia – através da obstrução dos poros – dificultando a difusão do CO_2 [36].

A formação de cristais de carbonato de cálcio (provenientes da carbonatação) nos poros, promove a densificação da estrutura da matriz cimentícia e o seu crescimento é

bloqueado pelas paredes dos poros, deste modo originam-se tensões internas que provocam a deterioração dos materiais à base de cimento. A calcite e a vaterite são produtos provenientes do processo de carbonatação [37, 38, 39].

2.2.2.3 Reação álcalis-sílica

A reação álcalis-sílica (RAS) é uma reação química entre as diversas formas de sílica reativa e iões álcalis (Na^+ , K^+), presentes no agregado e na matriz cimentícia, respetivamente. O agregado reativo possui uma micro-estrutura desordenada e, por isso, é instável num meio com valores de pH elevado e ao reagir com os grupos hidroxilos (OH^-) presentes na solução intersticial das pastas de cimento, origina um gel de silicato alcalino [40].

A RAS inicia-se e mantém-se mediante três condições: i) agregado reativo; ii) o cimento com mais de 0,4% de óxido de sódio (Na_2O) [40]; iii) humidade entre 70 a 90%. A velocidade com que ocorre a expansão do gel de silicato está associada a quatro fatores: i) o aumento de temperatura (reação endotérmica favorecida no sentido direto) [41]; ii) a área da superfície específica da sílica, sendo que quanto maior a relação superfície/volume maior a quantidade de sílica disponível para a reação álcalis-sílica [42]; iii) as tensões confinantes [42, 43] e iv) a contribuição de álcalis externos quer sejam provenientes da água dos solos com elevados teores de sulfatos [41, 44], seja o cloreto de sódio utilizado como descongelante [41, 45] ou seja, a exposição de materiais cimentícios à água do mar principalmente em zonas de marés onde existem ciclos de molhagem e secagem [41, 46] que podem contribuir com um aumento de álcalis nos materiais à base de cimento [37, 47, 48].

A prevenção da RAS nos materiais à base de cimento consiste em evitar a utilização de agregados reativos, na incorporação de adjuvantes químicos (sais de lítio) ou, mais vulgarmente, na adição de pozolanas (sílica de fumo, cinzas volantes e escórias de alto forno). Na presente dissertação utilizou-se catalisador exausto de FCC para minimizar o efeito da RAS. A metodologia para prevenir a RAS, em Portugal, encontra-se especificada na E 461 [49].

2.3 Formas de contribuir para a durabilidade dos materiais

Nenhum material por si próprio apresenta uma durabilidade infinita. No caso dos materiais cimentícios a durabilidade é condicionada pelas suas características

intrínsecas, pelas condições de agressividade do meio e pelo tipo de solicitações de natureza física e mecânica a que se encontram submetidos.

A deterioração dos materiais cimentícios resulta normalmente do incumprimento de práticas corretas na colocação, consolidação, acabamento e cura, ou da escolha incorreta quanto à qualidade e quantidade dos constituintes necessários à preparação dos materiais cimentícios [2, 47].

Na reparação de uma estrutura degradada recorre-se à utilização de argamassas de reparação cimentícia. Para orientar, uniformizar e avaliar a escolha dos sistemas de reparação foi elaborada a norma NP EN 1504 [50] que define os princípios ou estratégias de actuação na reparação de estruturas [51, 52, 53, 54, 55].

2.4 Argamassas de reparação

As argamassas são compostas por uma mistura homogénea de agregados finos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adjuvantes, com diferentes propriedades. A formulação da argamassa é normalmente baseada na premissa de que os vazios existentes nos agregados, entre 25% a 40%, devem ser preenchidos com ligante, o que, também, vai proporcionar coesão à mistura final [56].

As técnicas de reparação têm evoluído muito nos últimos tempos com a introdução de novos aditivos nas argamassas de reparação dando origem a uma grande variedade de produtos para reparação. A argamassa de reparação deve: evitar que a estrutura se continue a deteriorar, restaurar a integridade estrutural e permitir um acabamento aceitável [57, 58, 59, 60]. As diferenças entre as propriedades da argamassa de reparação e do suporte, originam tensões internas que provocam a fendilhação, a perda de capacidade resistente e a delaminação ou desagregação [57, 61].

A avaliação do desempenho de uma argamassa de reparação deve ter em consideração os seguintes fatores:

- Propriedades mecânicas – rigidez, elasticidade, resistência e tempo de presa;
- Resistência a ataques químicos;
- Aderência ao material original;
- Permeabilidade à água;
- Trabalhabilidade.

O conhecimento destas características antes e depois do endurecimento permite obter bons resultados no trabalho efetuado [57].

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

As argamassas de reparação são preparadas de acordo com os requisitos da norma NP EN 196-1 [62] (secção 3.3). Na Tabela 2.1 encontram-se as características de desempenho das argamassas de reparação estrutural e não estrutural, requeridas pela norma NP EN 1504-3 [63].

Tabela 2.1 - Requisitos de desempenho de produtos de reparação estrutural e não estrutural (norma NP EN 1504-3 [63])

Nº	Características de Desempenho	Método de Ensaio	Requisito			
			Estrutural		Não Estrutural	
			Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
1	Resistência à compressão	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
2	Teor de Cloretos	EN 1015-17	≤ 0,05%		≤ 0,05%	
3	Aderência	EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
4	Retração/Expansão impedidas	EN 12617-4	Resistência de colagem após ensaio			Sem requisito
			≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
5	Resistência à carbonatação	EN 13295	dk de carbonatação inferior à argamassa de referência			Sem requisito
6	Módulo de Elasticidade	EN 13412	≥ 20 GPa	≥ 15 GPa	Sem requisito	
7	Compatibilidade térmica Parte 1, gelo-degelo	EN 13687-1	Resistência de colagem após 50 ciclos			Inspeção visual após 50 ciclos
			≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
8	Compatibilidade térmica Parte 2, ciclos térmicos com chuva	EN 13687-2	Resistência de colagem após 30 ciclos			Inspeção visual após 30 ciclos
			≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
9	Compatibilidade térmica Parte 1, ciclos térmicos a seco	EN 13687-4	Resistência de colagem após 30 ciclos			Inspeção visual após 30 ciclos
			≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
10	Resistência ao deslizamento	EN 13036-4	Classe I: > 40 unidades ensaiadas molhadas Classe II: > 40 unidades ensaiadas secas Classe III: > 55 unidades ensaiadas secas	Classe I: >40 unidades ensaiadas molhadas Classe II: > 40 unidades ensaiadas secas Classe III: > 55 unidades ensaiadas secas		
11	Coefficiente de dilatação térmica	EN 1770	Não requerido se forem realizados os ensaios 7,8 e 9; senão, valor declarado.		Não requerido se forem realizados os ensaios 7,8 e 9; senão, valor declarado.	
12	Absorção capilar	EN 13057	≤ 0,5 kg.m ⁻² .h ^{-0,5}			Sem requisito

Após a identificação das causas de degradação há que decidir quais os princípios e métodos a utilizar para concretizar com sucesso a reparação. Na Tabela 2.2 são indicados alguns princípios e métodos para proteção e reparação estrutural e não estrutural de estruturas de betão.

Tabela 2.2 - Princípios e métodos para a proteção e reparação de estruturas de betão norma NP EN 1504-9 [64]

Princípio	Método para satisfazer o princípio
Preservação ou restauração da passividade	Aumento do recobrimento com novo betão ou <u>argamassa</u>
	Substituição do betão contaminado ou carbonatado
	Realcalinização eletroquímica do betão carbonatado
	Realcalinização do betão carbonatado por difusão
	Extração eletroquímica dos cloretos
Restauração do betão	<u>Argamassa</u> aplicada à mão
	Novo betão
	Betão ou <u>argamassa</u> projetado
	Substituição de elementos
Aumento da resistência física do betão	Revestimentos
	Impregnação
	Adição de <u>argamassas</u> ou betão
Aumento da resistência química do betão	Revestimentos
	Impregnação
	Adição de <u>argamassas</u> ou betão

2.4.1 Cimento

Nas argamassas de reparação estrutural o ligante utilizado é o cimento. Este é um ligante hidráulico, ou seja, um material inorgânico moído finamente que ao ser misturado com água forma uma pasta através de reações e processos de hidratação, ganha presa e endurece, conservando a estabilidade e a capacidade de resistência, mesmo quando submerso [5, 65, 66].

O cimento é constituído, essencialmente, por calcário e argila que, após submetidos a elevadas temperaturas (1450°C) originam o clínquer cujos principais constituintes são silicatos e aluminatos [27, 65]:

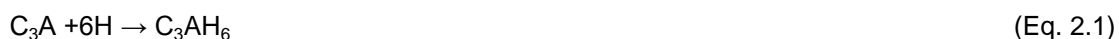
- Silicatos bicálcicos ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) - C_2S
- Silicatos tricálcicos ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) - C_3S
- Aluminatos tricálcicos ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) - C_3A
- Aluminatoferatos tetracálcicos ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) - C_4AF

O clínquer, após ser finamente moído com gesso (3 a 8% em massa), origina o cimento Portland. O gesso ao ser misturado com o clínquer tem como objetivo retardar a hidratação do C_3A , dificultando a ocorrência do fenómeno de presa instantânea e acelerando a hidratação dos silicatos de cálcio, aumentando a curto prazo, a resistência mecânica. O aumento do grau de finura de um cimento, provoca o aumento da área superficial específica das suas partículas acelerando a velocidade de hidratação [65].

2.4.2 Hidratação do cimento

Ao misturar o cimento com a água vão-se desencadear diversas reações químicas – reações de hidratação do cimento – que originam compostos hidratados estáveis responsáveis pela resistência do cimento [67]. Nomeadamente, os aluminatos hidratam tipicamente mais rapidamente que os silicatos. No entanto, a hidratação dos vários constituintes influenciam-se mutuamente, determinando a presa e o endurecimento da argamassa [68].

As reações químicas de hidratação [27] dos principais constituintes do cimento são apresentadas em seguida sob a forma de equações 2.1 e 2.2:



onde o aluminato tricálcico ao reagir com a água conduz a uma presa rápida com libertação de calor.



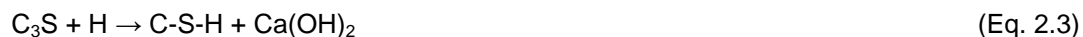
Para minimizar a ocorrência deste fenómeno adiciona-se gesso ao clínquer, numa pequena percentagem (3 a 8% em massa), que vai reagir lentamente com o aluminato tricálcico - C_3A – de acordo com a reação (Eq. 2.2) formando sulfoaluminato de cálcio hidratado.

Ao mesmo tempo que se dá a hidratação do C_3A também se verifica a hidratação do C_4AF – aluminoferrato tetracálcico. O C_4AF ao reagir com a água origina aluminatos de cálcio hidratados, C-A-H. Estes podem ter ou não ter ferro na sua constituição.

O silicato tricálcico, C_3S ao reagir com a água (Eq. 2.3), origina uma libertação significativa de calor formando silicatos de cálcio hidratados, C-S-H e hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$ e como consequência verifica-se a perda de elasticidade da

argamassa. A reação de hidratação do silicato bicálcico C_2S (Eq. 2.4) é mais lenta, provocando uma diminuição na quantidade de calor libertado.

Estas transformações químicas estão representadas nas equações 2.3 e 2.4:



Em seguida, verifica-se a reação de hidratação dos aluminatos - C_3A e C_4AF - originando compostos de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (Aft). Por último, com a continuação da formação (ao longo dos anos) de C-S-H a partir do C_2S ocorre a formação de monossulfoaluminato de cálcio hidratado (Afm).

Os compostos hidratados de C-S-H constituem a fase ligante mais importante dos materiais à base de cimento uma vez que estabelecem entre si ligações de Van der Waals que asseguram a aglomeração das fases sólidas e determinam a sua coesão e adesão [65, 67].

2.5 Influência das pozolanas nas características das argamassas

As pozolanas são materiais que possuem na sua composição silicatos ou aluminossilicoaluminatos amorfos com pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando em contato com a água e à temperatura ambiente, que reagem com $Ca(OH)_2$ originando compostos químicos que se formam na hidratação do cimento (secção 2.4.2) com propriedade ligantes [69]. Podem ser naturais, artificiais ou ainda subprodutos industriais. As pozolanas naturais resultam de magmas, ricos em sílica que, ao solidificarem, ficam no estado amorfo, ou criptocristalino [70]. As pozolanas artificiais são argilas de qualquer tipo, submetidas a temperaturas entre os 500 e os 900 °C, suficientes para a desidratação, mas inferiores ao limite de fusão, conferindo-lhe propriedades pozolânicas [71]. Os subprodutos industriais com propriedades pozolânicas que são correntemente utilizados como substitutos parciais do cimento nos materiais cimentícios são: as cinzas volantes, um resíduo muito fino que resulta da queima do carvão pulverizado ou moído e que é arrastado nos gases da combustão; e a sílica de fumo, que resulta da preparação do silício ou de ligas de silício em fornos elétricos de arco, onde a elevadas temperaturas o quartzo é reduzido pelo carvão.

Verifica-se, ao utilizar pozolanas como substituição parcial de cimento, que quanto maior a superfície específica da pozolana mais cedo se inicia a reação pozolânica [22].

As pozolanas apresentam vantagens na sua utilização como substituto parcial de cimento nos produtos cimentícios. A vantagem de natureza técnica, reside na diminuição de concentração em hidróxido de cálcio da solução de contacto dos componentes hidratados do cimento Portland, o que vai impedir as reações expansivas, reduzir o calor de hidratação do cimento e ainda contribuir para o abaixamento da sua tensão de rotura. Todos estes fatores contribuem para que os produtos cimentícios sejam vantajosos na construção ou reparação de elementos estruturais de grande volume. A vantagem de natureza económica reside no seu baixo custo [70].

No geral, o uso de materiais cimentícios suplementares (SCM) está associado ao refinamento dos poros que compõe a matriz cimentícia [72]. Os poros capilares são os principais responsáveis pela percolação da água e pela difusão. A utilização das pozolanas promove a redução do tamanho dos poros [73, 74, 75]. Esta situação advem da consequência da reação pozolânica onde hidróxido de cálcio é transformado em C-S-H, este por sua vez vai diminuir a dimensão dos poros. Com a diminuição dos poros diminui a absorção capilar [76, 77] e aumenta a resistência à compressão e a durabilidade [78].

Na reação pozolânica a formação de silicatos de cálcio hidratados, aluminatos de cálcio hidratados e aluminossilicatos de cálcio hidratados (C-S-H, C-A-H e C-A-S-H) provenientes da reação entre a pozolana, e o hidróxido de cálcio, que influenciam o processo de hidratação do cimento (secção 2.4.2), refinam os poros, diminuem a quantidade de poros de maior diâmetro e aumentando a quantidade de poros de diâmetro inferior [79, 80, 81].

Na Tabela 2.3 são apresentados os resultados obtidos em estudos sobre a resistência à degradação de materiais à base de cimento com substituição parcial de cimento por diferentes pozolanas. Estes estudos foram efetuados por vários autores.

Sendo o catalisador exausto de FCC a pozolana (resíduo) em estudo nesta dissertação, será analisado mais pormenorizadamente na secção 2.5.1.

Tabela 2.3 - Resistência à degradação de materiais à base de cimento com substituição parcial de cimento por pozolanas

Substitutos parciais de cimento	Resistência à degradação por:					Referências bibliográficas
	Efeito da RAS	Absorção capilar	Ação dos Cloretos	Carbonatação	Permeabilidade ao oxigénio	
Sílica Fumo	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui	-	[24] [26] [82] [83] [84] [85]
Cinzas Volantes	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui	-	[26] [31] [65] [86] [87] [88]
Casca de arroz	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	[89] [90] [91] [92] [93] [94] [95]
Metacaulino	Diminui	Aumenta	Aumenta	Aumenta	-	[36] [77] [96] [97] [98]
Zeólito Modificado	Aumenta	-	Diminui	-	Diminui	[21] [99]
Escória de alto-forno	Diminui	Aumenta	Aumenta	Diminui	Aumenta	[36] [65] [100]
Lama Vermelha	Diminui	Aumenta	Diminui	Diminui	-	[21] [101] [102]
Zeólito natural	Aument	Aumenta	Aumenta		Aumenta	[22] [32] [24] [85] [88]

2.5.1 Catalisador exausto FCC

O petróleo é uma mistura de compostos orgânicos e inorgânicos onde predominam os hidrocarbonetos cujas moléculas apresentam grandes dimensões. O petróleo, como matéria-prima da indústria petrolífera e petroquímica, após extração do solo, segue para a refinaria onde as moléculas de hidrocarbonetos são separadas consoante as suas diferentes densidades e volatibilidades [103].

É um processo denominado *cracking* catalítico em meio fluidizado (do inglês *Fluid Catalytic Cracking*) que se realiza a temperaturas elevadas entre 300 e os 700 °C, a pressões moderadas entre 2 e 3 bar na presença de um catalisador fluidizado em pó [104, 105]. O catalisador exausto de FCC é constituído por micropartículas cuja dimensão varia entre 60 a 100 µm. Na sua composição existem quatro constituintes principais:

- Zeólito Y, um aluminossilicato cristalino que constitui entre 15 a 50% em massa, da massa do catalisador. Apresenta-se como constituinte ativo principal;
- Matriz, também com atividade catalítica e constituída por alumina ou sílica-alumina amorfa;
- Ligante, assegura a resistência e integridade ao catalisador e é composto essencialmente por sílica;

- Filler, tal como o ligante assegura resistência e integridade ao catalisador e geralmente é uma argila.

Nos estudos que se seguem a origem do catalisador exausto de FCC é diferente da origem do utilizado nesta dissertação (secção 3.2.2). Enquanto o catalisador exausto de FCC utilizado nesta dissertação é proveniente da refinaria de Sines, o catalisador exausto utilizado nos ensaios dos estudos analisados é proveniente da BP – Oil España S.A. refinaria de Castellón (Espanha) [21, 30, 31, 33, 39, 78, 106, 107] e da companhia Repsol YPF [108].

O catalisador exausto de FCC tem na sua constituição elevados teores de alumina e sílica e uma elevada superfície específica, o que o torna um potencial material pozolânico.

Na observação das partículas de catalisador exausto de FCC por microscópio electrónico de varrimento (MEV), verifica-se que estas apresentam formas irregulares e um elevado grau de rugosidade [106].

O catalisador exausto de FCC é uma pozolana que exige grandes quantidades de água, devido a ser muito absorvente, quanto menor a quantidade de água menor será a trabalhabilidade mesmo quando se adiciona uma quantidade de superplastificante elevada [30]. Verifica-se, então, que quanto maior for a substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC, maior tem que ser a quantidade de água e de superplastificante adicionados, de modo a manter um espalhamento razoável [21]. A trabalhabilidade das argamassas, que têm na sua composição catalisador exausto de FCC, quando comparadas com a argamassa sem substituição é menor e, a principal razão para este comportamento relaciona-se com a elevada superfície específica do catalisador exausto de FCC que origina uma elevada absorção de água [108].

Sendo considerado uma das pozolanas mais reativas (por comparação entre os valores da resistência mecânica das argamassas com e sem catalisador exausto de FCC) verifica-se que os valores da resistência mecânica das argamassas com este resíduo são mais elevados e surgem mais cedo. A justificação está no facto do catalisador exausto de FCC ser uma pozolana de elevada reatividade [106].

Na Tabela 2.4 são apresentados resultados obtidos em diferentes argamassas pozolânicas com substituições parciais de cimento de 10% e 20%. A substituição parcial de cimento por 10% de catalisador exausto de FCC apresenta maior resistência mecânica comparativamente a qualquer uma das outras estudadas (inclusive sem substituição). Este facto pode ser atribuído à reação pozolânica que

supera o efeito de diluição. O mesmo já não se confirma para uma substituição parcial de 35% de catalisador exausto de FCC na qual o efeito de diluição (que consiste na diminuição da concentração de cimento originada pela incorporação de um substituto cimentício (pozolana)) se torna o fenómeno dominante [107].

Tabela 2.4 - Ensaio de resistência mecânica obtida em argamassas pozolânicas com substituição de 10% e 20% cimento e com misturas binárias de sílica de fumo (SF), cinzas de casca de arroz (RHS), resíduo de *cracking* catalítico em leito fluidizado (FCC) com cinzas volantes (FA) [33, 78]

Pozolana	Argamassa (%P/%FA)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à flexão (MPa)		
		7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias
RHA	Arg. Ref.	45,10	51,20	58,20	8,00	8,70	9,50
	0%/20%	40,80	44,50	56,80	6,80	8,10	9,10
	10%/0%	47,30	53,5	62,50	7,70	8,80	8,50
	10%/20%	39,40	52,10	59,70	6,50	8,00	7,90
SF	Arg. Ref.	41,98	49,92	56,66	6,39	7,42	7,86
	10%/0%	43,67	56,53	62,30	7,28	8,44	9,20
	10%/20%	41,83	52,62	62,04	5,83	8,47	9,42
FCC	Arg. Ref.	56,76	59,11	72,63	7,65	9,33	9,67
	0%/20%	44,89	59,05	67,68	6,86	6,52	9,00
	<u>10%/0%</u>	<u>66,48</u>	<u>75,9</u>	<u>83,67</u>	<u>9,60</u>	<u>10,08</u>	<u>11,44</u>
	10%/20%	55,05	65,95	70,08	7,61	8,27	9,14

Arg. Ref. – argamassa de referência

Nas argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC verifica-se uma redução da reserva alcalina devido à reação pozolânica. Numa argamassa quanto maior a relação a/c maior o volume de porosidade. Regra geral, as argamassas que têm na sua composição catalisador exausto de FCC apresentam uma diminuição da porosidade devido à formação de novos componentes originados pelas reações pozolânicas [33].

Por meio de estudos de porometria por intrusão de mercúrio sabe-se que a incorporação de catalisador exausto de FCC reduz o diâmetro dos poros, principalmente para os poros de diâmetro inferior a 0,5 µm [30]. As argamassas com incorporação de 15% de catalisador exausto de FCC apresentam uma redução importante da porosidade capilar, ou seja, um aumento de poros de gel que devido ao seu tamanho muito pequeno não contribuem para processos de difusão [29, 30, 33].

O coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário de uma argamassa que contem na sua constituição 15% de catalisador exausto de FCC, 52,5R CEM e 20% de cinzas volantes (FA) apresenta um coeficiente de difusão menor, o que é consistente com o facto de haver maior teor de Al₂O₃. A difusão de cloretos em regime

não estacionário é afetada pela porosidade e pela capacidade de retenção de cloretos por parte da matriz cimentícia. Por outro lado, a formação de sal de Friedel (Fs) consome a reserva alcalina e forma uma barreira que vai dificultar a penetração de cloretos na matriz cimentícia [30].

Em análises termogravimétricas (TGA) verifica-se que à medida que aumentam as quantidades de catalisador exausto de FCC dá-se uma diminuição da Portlandite (hidróxido de cálcio), como consequência da reação pozolânica pois ocorre uma diminuição do teor de cimento. Em contrapartida, obtém-se a formação adicional de hidratos de silicatos de cálcio (C-A-H) e hidratos de aluminossilicatos de cálcio (C-A-S-H) os quais aumentam devido à presença do catalisador exausto de FCC, sendo estes os produtos principais da reação pozolânica.

Através de análise de difração por raio X (DRX) é confirmada a presença de sal de Friedel (Fs) que tem origem nas reações entre C-S-H e os cloretos (Eq. 2.5 e 2.6):



A formação de Fs consome alguma da reserva alcalina, originando uma redução da Portlandite (hidróxido de cálcio) devido quer há formação de Fs quer à reação pozolânica do catalisador exausto de FCC. Com o aumento da substituição parcial do cimento por catalisador exausto de FCC verifica-se o aumento do teor de Fs resultado do efeito do catalisador exausto de FCC, no que diz respeito à capacidade de retenção dos cloretos por parte da matriz cimentícia. Quanto maior for a quantidade de catalisador exausto de FCC maior é a formação de C-A-H e C-A-S-H o que contribui para um aumento da resistência à penetração dos cloretos por parte da matriz cimentícia [30, 31].

Na Figura 2.1 são apresentados os resultados obtidos em estudos [30] feitos sobre a difusão de cloretos em regime não estacionário, em argamassas contendo 5%, 10%, 15% e 20% catalisador exausto de FCC com razão a/c não constantes e com adição de Superplastificante (SP) apenas para razão a/c baixas (0,3-0,4).

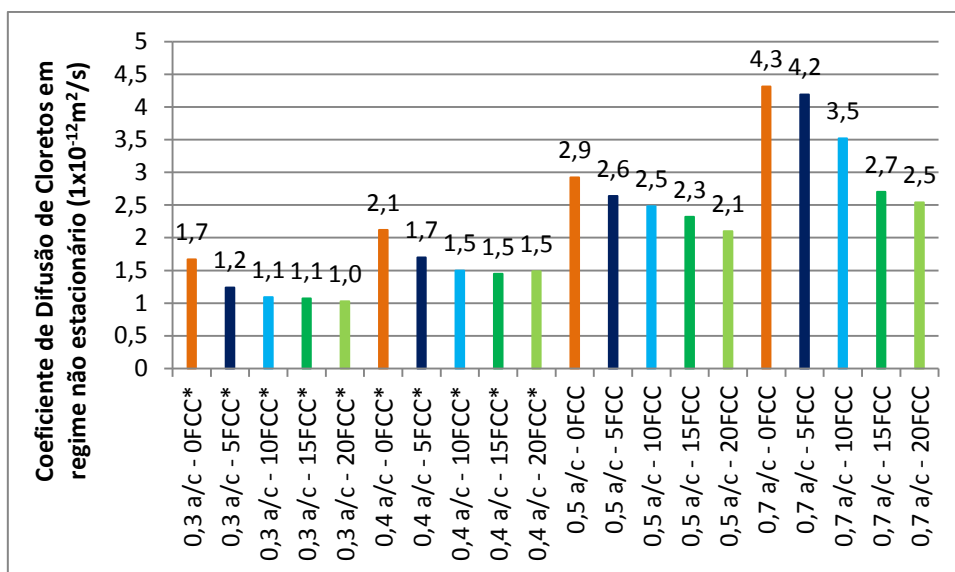


Figura 2.1 - Difusão de cloretos em regime não estacionário em argamassas incorporadas com 5%, 10%, 15% e 20% FCC com razão a/c não constantes e com adição de SP apenas para razão a/c baixas (0,3 a 0,4) [30].

Na determinação de coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (Figura 2.1) verificou-se uma redução significativa destes parâmetros com o aumento de catalisador exausto de FCC como substituto parcial do cimento e por outro lado, quanto menor for a razão a/c menor é o coeficiente de difusão de cloretos. A reação pozolânica originada pela incorporação de catalisador exausto de FCC como substituto parcial do cimento dá origem à formação de C-A-H e C-A-S-H que reduz a porosidade capilar da argamassa cimentícia. Ambos os fatores acima descritos contribuem o para a redução da difusão de cloretos em regime não estacionário [30].

Em estudos realizados, relaciona-se a profundidade de carbonatação com a razão a/c (Figura 2.2). Verifica-se que a profundidade de carbonatação é muito maior em argamassas com razão a/c entre 0,5 a 0,7 do que em argamassas com razão a/c entre 0,3 a 0,4. Apesar do catalisador exausto de FCC diminuir o teor de Portlandite, presente na matriz cimentícia, e do efeito de diluição, estes não afetam negativamente o comportamento do ensaio de carbonatação, pois o refinamento dos poros (diminuição da estrutura dos poros) originado pela reação pozolânica compensa parcialmente a “barreira química” da Portlandite [33].

Numa argamassa com catalisador exausto de FCC e com razão a/c entre 0,3 e 0,4, comparativamente à argamassa de referência, não se verifica uma diferença significativa relativamente à resistência à carbonatação, mas se a razão a/c for média 0,5, ou elevada (superior a 0,5), a substituição parcial do cimento por catalisador exausto de FCC diminui a resistência à carbonatação (Figura 2.2). Embora a redução

de Portlandite nos poros não seja compensada pela estrutura mais densa, originada pela reação pozolânica com o intuito de impedir a rápida carbonatação da argamassa, em argamassas com baixa razão a/c a porosidade pode ser de menor diâmetro e quantidade, de modo a evitar os efeitos originados pela redução de Portlandite visto que, a elevada densidade da matriz cimentícia impede a penetração de CO_2 . Este comportamento é destacado por estudos feitos em argamassas com diferentes tipos de pozolanas: cinzas volantes (FA) e metacaulino (MK) [39].

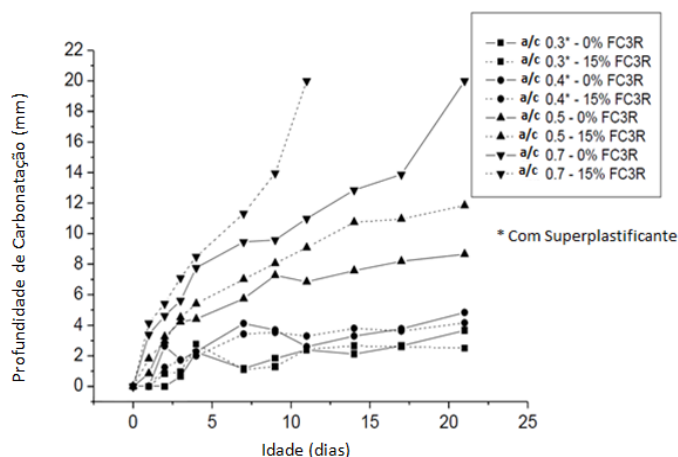


Figura 2.2 - Profundidade de carbonatação aos 21 dias para uma concentração de 100% CO_2 [33, 39].

Em argamassas com resíduo (FC3R – FCC) a portlandite reage com o CO_2 , consumido-o. De seguida o dióxido de carbono assimila o cálcio existente no C-A-H e no C-A-S-H, dando origem a carbonato de cálcio e hidróxido de alumínio. A quantidade de carbonato de cálcio diminui quando se aumenta a substituição parcial de cimento, pois o carbonato de cálcio está diretamente relacionado com a quantidade de cimento, visto este ser a única “fonte de cálcio”. O CO_2 após consumir o cálcio proveniente do cimento vai reagir com a sílica e alumina, que contêm cálcio. Assim, o C-S-H, o C-A-H e o C-A-S-H vão dar origem ao S-H, ao A-H e ao A-S-H. Em suma, na carbonatação quando muito agressiva, o CO_2 não só reage com a Portlandite como também reage com os produtos provenientes da atividade pozolânica. Nas argamassas com catalisador exausto de FCC, como substituto parcial do cimento, esta porosidade tende a diminuir devido à formação de componentes ligantes adicionais originários da reação pozolânica [37].

As análises termogravimétricas (TGA) revelam que os produtos formados pela reação pozolânica do catalisador exausto de FCC como a Portlandite são o C-S-H, C-A-H e C-A-S-H de várias composições, sendo semelhantes aos produtos formados pelas reações pozolânicas com Metacaulino. O catalisador exausto de FCC apresenta uma

reatividade superior à do Metacaulino para pastas com teor inferior de Portlandite [107].

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

3 CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

Esta campanha experimental teve como objetivo avaliar a influência do catalisador exausto de FCC no estudo das características que se relacionam com a durabilidade de argamassas cimentícias para reparação estrutural e que por sua vez a condicionam, nas quais o cimento é substituído parcialmente por um resíduo da indústria petroquímica – catalisador exausto de FCC (secção 2.5.1). Na realização desta campanha foi necessário executar ensaios de argamassas quer no estado fresco quer no estado endurecido. Na Tabela 3.1 apresenta-se uma sistematização dos ensaios experimentais realizados bem como das normas nas quais se basearam os respetivos procedimentos experimentais.

Tabela 3.1- Sistematização dos ensaios de avaliação do efeito da incorporação de catalisador exausto de FCC em argamassas cimentícias

Série	Argamassas		Ensaio	Idade do Ensaio (*)	Norma	
	Notação	Ligante (% mássica)				
		CEMI (C)				Catalisador FCC
RAS	RAS_100C	100	0	Estado Fresco	Consistência - 0 h ASTM C 1437-07 e ASTM C230-09	
	RAS_95C_5FCC	95	5			Massa volúmica - 0 h ASTM C231
	RAS_90C_10FCC	90	10	Estado Endurecido	Teor de ar - 0 h ASTM C231-09	
	RAS_85C_15FCC	85	15			Reacção álcalis-silica - 3, 6, 8, 10, 13, 16, 20, 24, 30 d ASTM C1260-07, ASTM C490-09 e ASTM C1567-08
Durabilidade	100C	100	0	Estado Fresco	Consistência - 0 h ASTM C 1437-07 e ASTM C230-09	
	95C_5FCC	95	5			Massa volúmica - 0 h ASTM C231
	90C_10FCC	90	10	Estado Endurecido	Teor de ar - 0 h ASTM C231-09	
	85C_15FCC	85	15			Resistência à flexão e compressão - 2, 7, 28, 56, e 91 d EN 196-1
					Módulo de elasticidade à compressão - 28 d EN 13412	
					Absorção capilar - 12 e 30 m, 1, 2, 4 e 24 h prEN 13057	
					Difusão de cloretos - 28d E 463	
				Resistência à carbonatação acelerada - 60, 70, 98, 116, 133 d EN 13295		
				Permeabilidade ao oxigénio - 72 d E 392		

(*) *Legenda:* m – minutos; h – horas; d – dias

Para a concretização dos ensaios prepararam-se argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC. Em particular, houve a necessidade de garantir que, no caso das argamassas usadas nos ensaios de avaliação do efeito do catalisador exausto de FCC na reação álcalis-silica, a areia que a integra fosse reativa (secção 3.2.3.1). No caso das argamassas preparadas para todos os outros ensaios, utilizou-se areia de referência (secção 3.2.3.2) e incorporou-se SP de modo a permitir uma maior substituição parcial de cimento por catalisador

exausto de FCC. Estes factos conduziram à necessidade de preparar duas séries de argamassas diferentes para as quais se adotou, respetivamente, a designação de “série de argamassas *RAS*” e “série de argamassas *Durabilidade*”. Detalhes sobre os constituintes e procedimentos de preparação das argamassas encontram-se nas secções 3.3, 3.3.1 e 3.3.2 e os protocolos experimentais dos ensaios nas secções 3.4 e 3.5.

O enquadramento da campanha experimental no contexto global da dissertação encontra-se representado no fluxograma da Figura 3.1.

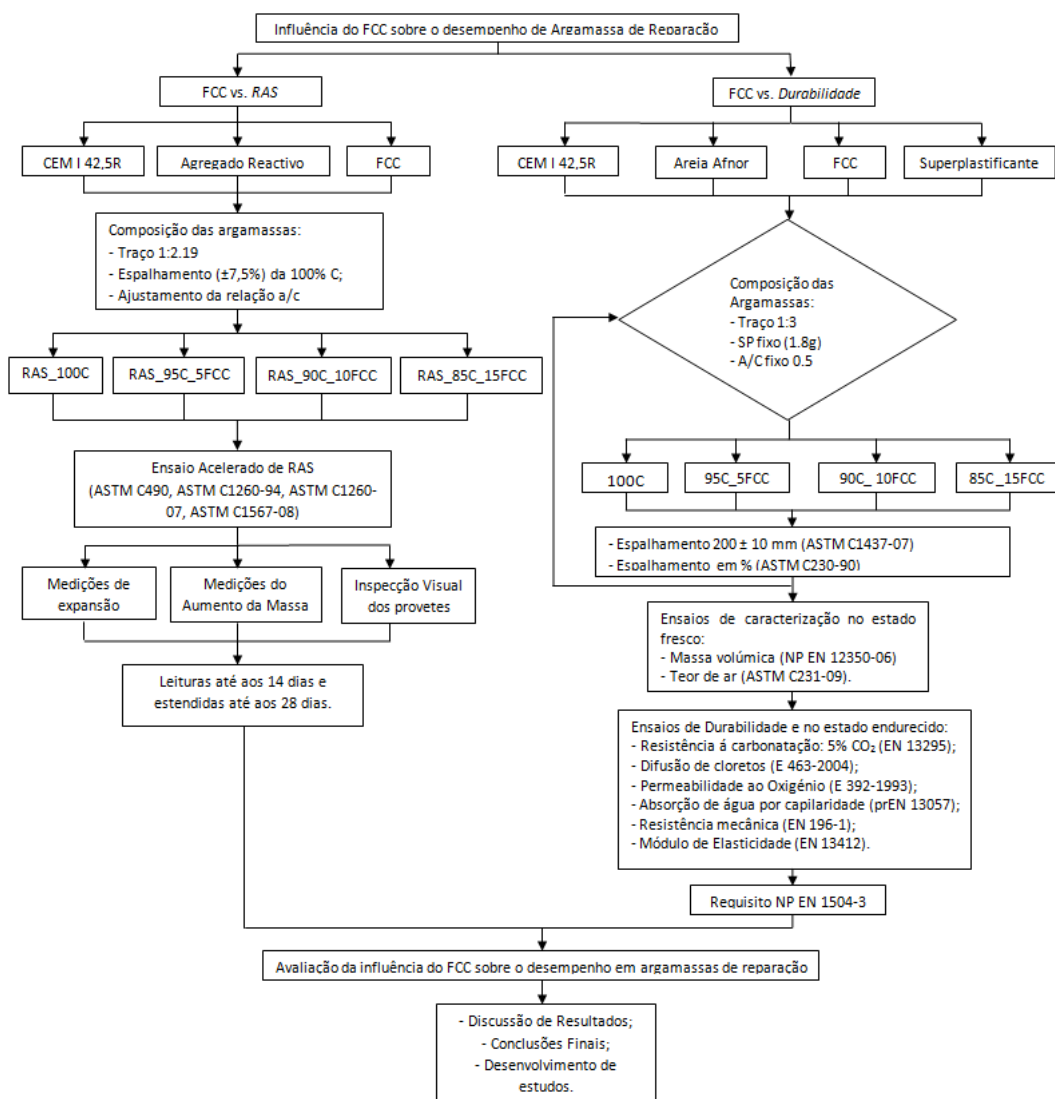


Figura 3.1- Enquadramento da campanha experimental no contexto global da dissertação [104].

Na secção 3.2 apresentam-se os materiais utilizados na constituição das argamassas da série de argamassas *RAS* e da série de argamassas *Durabilidade*.

3.2 Materiais

O acondicionamento correto dos materiais assegura a conservação destes, de modo a evitar o seu envelhecimento e degradação. Aproveitou-se a quantidade suficiente de materiais, e foram retiradas as porções necessárias para cada campanha de ensaios, tendo a preocupação de homogeneizar, previamente, os materiais.

3.2.1 Cimento

Em toda a campanha optou-se pelo cimento CEM I (cimento Portland), de acordo com a norma NP EN 197-1 [66], com classe de resistência 42,5R fornecido pela empresa CIMPOR. Este cimento apresenta uma percentagem de clínquer superior a 95%. A escolha do cimento deveu-se ao facto de ser o cimento comercializado em Portugal.

A ficha técnica deste material encontra-se no Anexo B – Ficha de Materiais.

3.2.2 Catalisador exausto FCC

O catalisador exausto de FCC usado neste trabalho é um resíduo produzido na unidade de *cracking* catalítico da refinaria da Petrolgal em Sines (secção 2.5.1). É um material com características pozolânicas [109, 110] e que apresenta teores significativos de alumina e sílica na sua composição. Na Tabela 3.2 apresenta-se a composição química e propriedades físicas do catalisador exausto de FCC [104, 111].

Tabela 3.2 - Composição química do catalisador exausto FCC

Composição Química (%)	Catalisador exausto de FCC
SiO ₂	39,59
Al ₂ O ₃	52,81
Fe ₂ O ₃	0,55
CaO _{Total}	0,09
MgO	0,19
SO ₃	0,23
K ₂ O	0,04
Na ₂ O	0,68
Ti ₂ O	0,82
P ₂ O ₅	0,06
Mn ₂ O	0,00
SrO	0,00
Perda ao fogo	1,49

Tabela 3.3 - Propriedades física do catalisador exausto FCC

Propriedades Físicas	Catalisador exausto de FCC
Densidade (g/cm ³)	2,71
Dimensão média da partícula (µm)	80 -124,3

3.2.3 Areia

3.2.3.1 Areia utilizada nas argamassas da série RAS

Na preparação das argamassas da série RAS que foram usadas no ensaio de reação álcalis-sílica (secção 3.5.1) utilizou-se um agregado com a designação comercial “Seixo Brita Nº1 FB (5,6/11,2 mm)” fornecida pela empresa Lena Agregados, S.A.. A dimensão do Seixo Brita Nº1 FB varia entre os 5,6 e os 11,2 mm. Sendo esta granulometria superior à necessária para a preparação das argamassas do ensaio de avaliação da reação álcalis-sílica descrito na secção 3.3.1, a preparação dos agregados incluiu a sua correção granulométrica. Os equipamentos utilizados nesta preparação foram: britadeira (Retsch), balança, estufa (MEMMERT), peneiros, tabuleiros, balde metálico, varão metálico, recipientes e água. O agregado foi inicialmente moído com a britadeira Retsch (Figura 3.2 a)) de modo a conseguir obter as frações necessárias que são referidas na norma ASTM C1260-07 [112], apresentadas na Tabela 3.4. As frações obtidas (Figura 3.2 b),c),d), e), f)) foram em seguida lavadas num balde metálico com água. Durante a lavagem o balde foi agitado manualmente rodando quer no sentido horário quer no sentido contrário de modo a que as poeiras ficassem em suspensão na água (em alternativa poder-se-ia ter mexido o agregado recorrendo a um varão metálico, tendo em atenção que o agregado não fosse quebrado). A água com as poeiras foi retirada e repetiu-se a mesma operação até se conseguir obter água limpa.

Após a remoção do pó das diferentes frações granulométricas do agregado estas foram colocadas em diferentes tabuleiros e postas a secar numa estufa. Depois de bem secas foram colocadas e armazenadas em recipientes limpos e fechados.

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

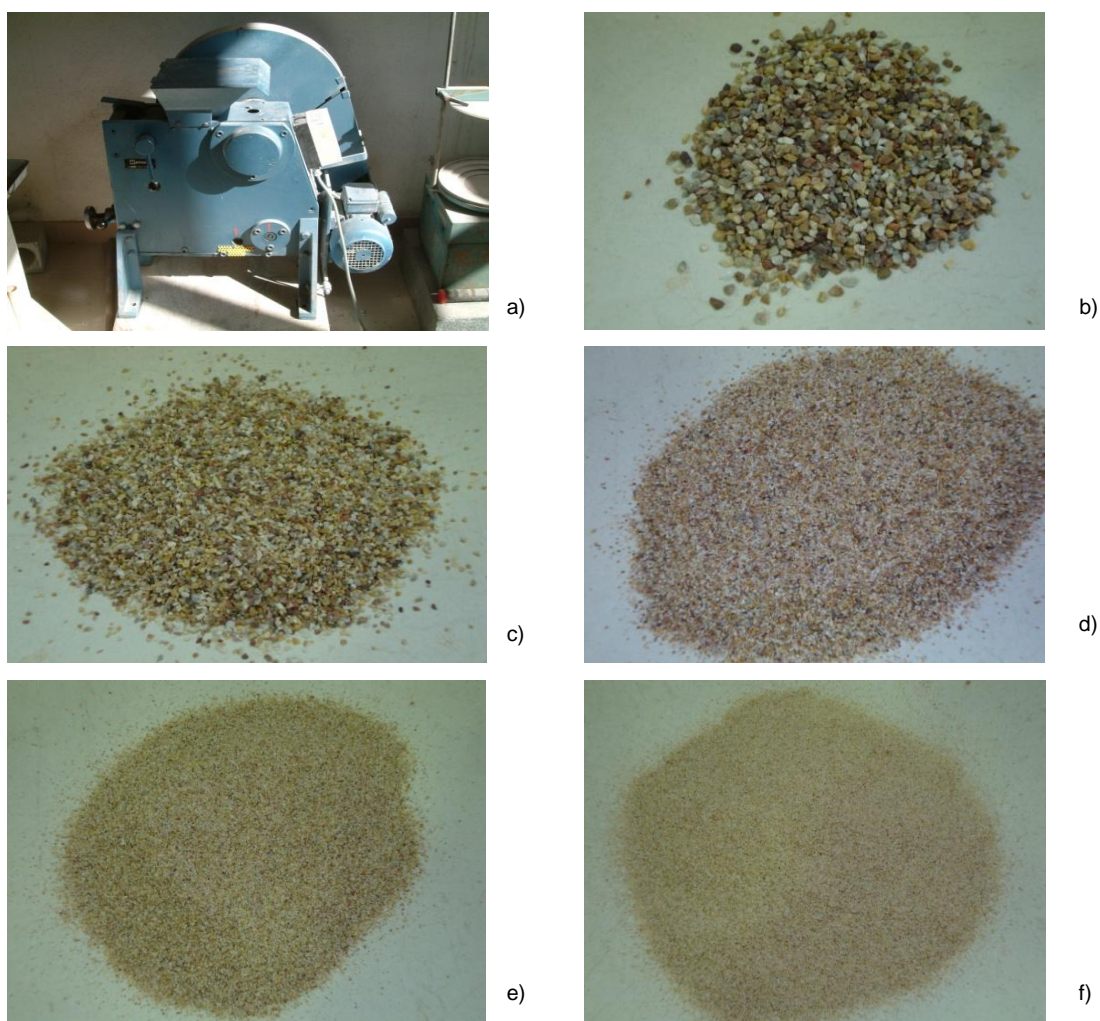


Figura 3.2 - Obtenção do agregado necessário para a preparação das argamassas da série RAS. a) Britadeira utilizada na moagem do seixo brita nº1 FB. b) Fração granulométrica do agregado de 2,36 mm do agregado retido no peneiro nº 8. c) Fração granulométrica do agregado de 1,18 mm do agregado retido no peneiro nº 16. d) Fração granulométrica do agregado 600 µm do agregado retido no peneiro nº 30. e) Fração granulométrica do agregado de 300 µm do agregado retido no peneiro nº 8. f) Fração granulométrica do agregado de 150 µm do agregado retido no peneiro nº 100.

Na preparação das argamassas da série de argamassas RAS, a quantidade de agregado é composta por diferentes frações granulométricas com diferentes percentagens mássicas, como apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Fração granulométrica retida e percentagem mássica necessária para a preparação da argamassa da série de argamassas RAS

Malha dos Peneiros	%
Fração granulométrica retida	mássica
2,36 mm (nº 8)	15
1,18 mm (nº 16)	25
600 µm (nº 30)	25
300 µm (nº 50)	25
150 µm (nº 100)	10

Recorrendo à norma americana ASTM C1260-07 [112] estabeleceram-se as proporções de ligante:agregado – 1:2,25, para um agregado com uma massa volúmica superior ou igual a 2,45 mg/m³. O agregado utilizado nas argamassas da série de argamassas *RAS* apresenta uma massa volúmica de valor igual a 2,59 mg/m³. Segundo a norma a quantidade de cimento definida é de 440 g, sendo assim determinou-se o valor da quantidade de agregado que é 990 g.

A ficha técnica do agregado (Anexo B – Ficha de Materiais) não especifica a sua reatividade, por este motivo recorreu-se à norma americana ASTM C1260-07 [112], segundo a qual se assume que o agregado é reativo quando após 14 dias do ensaio álcalis-sílica acelerado (descrito na secção 3.5.1) se verificar uma expansão superior a 0,2% relativamente à dimensão original do provete.

3.2.3.2 Areia utilizada nas argamassas da série *Durabilidade*

Na preparação das argamassas da série de argamassas *Durabilidade* (secção 3.3.2.1) utilizou-se uma areia natural, com grãos arredondados e siliciosa, certificada, conforme as exigências da norma NP EN 196-1 [62], e produzida pela empresa Societé Nouvelle du Litoral (SNL).

A ficha técnica deste material encontra-se no Anexo B – Ficha de Materiais.

3.2.4 Água

Nas amassaduras utilizou-se água destilada, obtida pelo Departamento de Química pertencente ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

3.2.5 Superplastificante

O superplastificante (SP) utilizado na série de argamassas *Durabilidade* foi o SikaPlast 898, um superplastificante de elevado desempenho. A sua incorporação teve como principal objetivo aumentar a fluidez das argamassas, porque o catalisador exausto de FCC tem grande afinidade com a água, contribuindo para a perda de trabalhabilidade das argamassas. A quantidade de incorporação de SP foi ajustada e controlada pelo ensaio de consistência por espalhamento (secção 3.4.1).

A ficha técnica deste material encontra-se no Anexo B – Ficha de Materiais.

3.3 Preparação de argamassas

No decorrer desta campanha experimental, tal como referido atrás (capítulo 3.1) foram preparadas duas séries de argamassas, a série de argamassas *RAS* e a série de argamassas *Durabilidade*. Os ensaios realizados com cada uma das séries de argamassas encontram-se sistematizados na Tabela 3.1.

Na otimização do tempo de realização dos ensaios avaliou-se a possibilidade de produzir uma maior quantidade de argamassa verificando-se que os resultados dos ensaios, seja no estado fresco, seja no estado endurecido, não eram afetados (Anexo C - Consistência por espalhamento). Como solução, optou-se pela preparação de uma quantidade maior de argamassa onde a quantidade de constituintes (Tabela 3.5 e Tabela 3.7) se triplicou.

3.3.1 Mistura das argamassas da série RAS

Nas argamassas da série de argamassas *RAS* foram elaborados ensaios no estado fresco e no estado endurecido enunciados na Tabela 3.1 e descritos na secção 3.4 e 3.5.1. Os procedimentos de ensaio adotados para o estado endurecido requerem provetes prismáticos com 25x25x250 mm de dimensão conforme descrito na secção 3.3.1.2.

O procedimento experimental, adotado na execução das argamassas da série de argamassas *RAS*, teve como base o descrito na ASTM C1260-94 [113]. A composição das argamassas e o respectivo traço ponderal (razão cimento/areia) da série de argamassas *RAS* é apresentada na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 - Designação e composição das argamassas da série RAS

Materiais	Composição da Série de argamassas RAS			
	RAS_100C	RAS_95C_5FCC	RAS_90C_10FCC	RAS_85C_15FCC
Cimento (g)	440	418	396	374
FCC (g)	-	22	44	66
Areia (g)	990	990	990	990
Traço Ponderal	1:2,19	1:2,19	1:2,19	1:2,19
Água (g)	206,8	217,14	217,14	222,31
a/c	0,47	0,49	0,49	0,51

Tabela 3.6 – Composição das argamassas da série RAS em kg/m³

Materiais (kg/m ³)	Composição da Série de argamassas RAS			
	RAS_100C	RAS_95C_5FCC	RAS_90C_10FCC	RAS_85C_15FCC
Cimento	519,1	513,0	514,1	507,0
FCC	-	25,6	51,4	76
Areia	1557,4	1538,9	1542,2	1520,9
Água	244,0	251,4	251,9	258,5

3.3.1.1 Preparação de argamassas da série RAS

No procedimento de preparação de argamassas da série RAS utilizou-se a balança, a misturadora mecânica Strommer, a proveta, o cronómetro, o raspador de borracha, a areia preparada em laboratório, a água destilada, o cimento CEM 42,5R (CIMPOR) e o catalisador exausto de FCC.

O processo de mistura das argamassas iniciou-se com a colocação da água com o auxílio de uma proveta, na cuba da misturadora e em seguida com a colocação do cimento, ao qual já se havia misturado previamente o catalisador exausto de FCC. De imediato, colocou-se a misturadora (Figura 3.3) em funcionamento a uma velocidade lenta iniciando-se a marcação do tempo com o auxílio de um cronómetro. Decorridos, 30 segundos introduziu-se a areia de modo constante ao longo de mais 30 segundos. Nos 30 segundos seguintes alterou-se a velocidade de misturadora para um modo mais rápido. Em seguida, parou-se a misturadora. Procedendo-se, durante 30 segundos à seguinte operação: com o auxílio de um raspador de borracha retirou-se toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo da cuba da misturadora colocando-a no meio desta. Por fim, continuou-se a amassadura a uma velocidade rápida por mais 60 segundos, para uma melhor homogeneização da mistura.



Figura 3.3- Misturadora mecânica utilizada na preparação das argamassas da série *RAS* e *Durabilidade*.

3.3.1.2 Moldagem, compactação, desmoldagem e identificação de argamassas da série *RAS*

Na realização destes procedimentos utilizou-se a câmara de cura (Fitoclima 300 EDTU), o pilão de plástico, a colher de metal, o martelo de madeira, a placa de vidro, o molde de borracha, a régua metálica, o pincel, o marcador e o óleo mineral.

Nas argamassas da série *RAS* os moldes utilizados na execução dos provetes prismáticos foram de 25x25x250 mm. Cada compartimento do molde foi preenchido com argamassa até meio da sua capacidade sendo, seguidamente, com a ajuda de um pilão de plástico compactado (Figura 3.4) percorrendo cada um dos compartimentos de extremidade a extremidade com o pilão na transversal de modo a abranger a largura do provete, tendo o cuidado de na zona onde se encontram os pernos mudar a posição do pilão, para que toda a argamassa em torno do perno fosse compactada de forma a evitar vazios no provete em redor do perno.

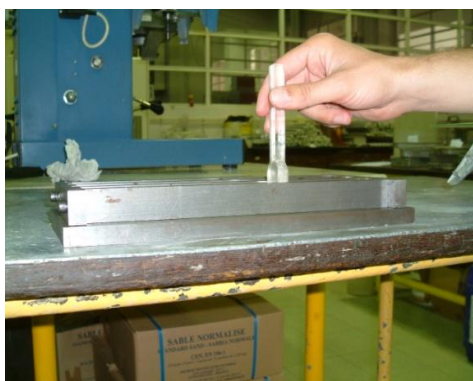


Figura 3.4 - Moldagem de provetes prismáticos (25x25x250 mm) das argamassas da série *RAS*, compactação da primeira camada de argamassa com o auxílio de um pilão de plástico.

Concluída a compactação da primeira camada, completou-se o enchimento dos compartimentos do molde e repetiram-se todas as operações atrás descritas até obter a compactação da segunda camada. Por fim, procedeu-se à regularização da

superfície removendo o excesso de argamassa com o auxílio de uma régua metálica. Em seguida, colocou-se um molde de borracha sobre os bordos do molde e por cima uma placa de vidro. De seguida, os moldes foram colocados numa câmara de cura (temperatura a 20 ± 2 °C e humidade relativa de 70 ± 5 °C) e ao fim de 24 ± 2 horas foram retirados da câmara de cura, desmoldados e identificados.

3.3.2 Mistura de argamassas da série *Durabilidade*

Nas argamassas da série de argamassas *Durabilidade* foram elaborados os ensaios anunciados na Tabela 3.1 e descritos na secção 3.4 e secção 3.5.2 que requerem provetes de formas e dimensões variadas, pelo que os processos de moldagem, compactação e desmoldagem dos provetes dos diferentes ensaios diferem entre si conforme é referido no secções 3.3.2.2.

O procedimento experimental adotado na execução das argamassas da série de *Durabilidade* teve como base o descrito na norma NP EN 196-1:2006 [62]. A composição das argamassas e o respectivo traço ponderal (razão cimento/areia) da série de argamassas *Durabilidade* é apresentada na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8.

Tabela 3.7 - Designação e composição das argamassas da série *Durabilidade*

Materiais	Composição da Série de argamassas Durabilidade			
	100C	95C_5FCC	90C_10FCC	85C_15FCC
Cimento (g)	450,0	427,5	405,0	382,5
FCC (g)	-	22,5	45,0	67,5
Areia (g)	1350	1350	1350	1350
Traço ponderal	1:3	1:3	1:3	1:3
Superplastificante (g)	1,8	1,8	1,8	1,8
Água (g)	225	225	225	225
a/c	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabela 3.8 - Composição das argamassas da série *Durabilidade* em kg/m³

Materiais (kg/m ³)	Composição da Série de argamassas Durabilidade			
	100C	95C_5FCC	90C_10FCC	85C_15FCC
Cimento	479,5	483,0	480,5	476,5
FCC	-	24,2	48,1	71,5
Areia	1438,5	1449,1	1441,5	1429,4
Superplastificante	1,9	1,9	1,9	1,9
Água	239,8	241,5	240,3	238,2

3.3.2.1 Preparação de argamassas da série *Durabilidade*

No procedimento seguido utilizou-se a balança, a misturadora mecânica (Strommer), os gobelés, o cronómetro, o raspador de borracha, a pipeta, o agregado SNL, a água destilada, o cimento CEM 42,5R (CIMPOR), o catalisador exausto de FCC, o superplastificante SikaPlast 898 (SIKA).

O processo de mistura da série de argamassas *Durabilidade*, iniciou-se com a colocação do agregado na cuba misturadora ao qual se juntou o cimento e o catalisador exausto de FCC, previamente misturados. Ligou-se a misturadora (Figura 3.3) numa velocidade lenta durante 60 segundos ao fim dos quais se juntou o restante agregado, tendo a preparação da mistura a seco prolongado-se por mais 60 segundos. Nos 60 segundos seguintes, adicionou-se 2/3 da água destilada, que se encontrava num gobelé, e iniciou-se a contagem do tempo. Em seguida, introduziu-se o SP com a restante água destilada e a misturadora continuou a fazer a envolvimento por mais 5 minutos, ao fim dos quais se seguiu um período de repouso de 2 minutos. Durante um período de 2 minutos de repouso, retirou-se toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo da cuba da misturadora, com o auxílio de um raspador de borracha, colocando-a no meio desta. Por fim, ligou-se novamente a misturadora durante 1 minuto.

3.3.2.2 Moldagem, compactação, desmoldagem e identificação das argamassas da série *Durabilidade*

❖ Provetes de ensaio de resistência mecânica, módulo de elasticidade e resistência à carbonatação acelerada

Para este procedimento utilizou-se o compactador automático, a colher de metal, as espátulas (maior e menor) do compactador, o martelo de madeira, a placa de vidro, o molde de borracha, a régua metálica, o pincel, o marcador e o óleo mineral.

Na execução dos provetes prismáticos de 40x40x160 mm, utilizados nos ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão (secção 3.5.2.1), de resistência à carbonatação acelerada (secção 3.5.2.4) e de determinação do módulo de elasticidade (secção 3.5.2.2), após a montagem da alonga o molde foi colocado na mesa de compactação mecânica onde se procedeu ao seu enchimento. Cada compartimento do molde foi cheio de argamassa até meio da sua capacidade, a argamassa foi estendida com a ajuda de uma espátula (maior). Este procedimento foi executado com a caixa do compactador automático aberto (Figura 3.5 a)). Em seguida a caixa do compactador automático foi fechada (Figura 3.5 b)) e este foi ligado, até perfazer 60 pancadas durante um minuto. Após a compactação da primeira camada, completou-se o enchimento dos compartimentos do molde e repetiram-se todas as operações atrás descritas (mas nesta fase utilizou-se a espátula menor) até obter a compactação da segunda camada. O molde foi retirado do compactador automático e colocado na mesa de apoio, onde se procedeu à regularização da superfície removendo o excesso de argamassa com o auxílio de uma régua metálica. Por fim, colocou-se um molde de borracha sobre os bordos do molde e por cima uma placa de vidro. O processo acima descrito foi utilizado apenas para provetes prismáticos com a dimensão 40x40x160 mm.



a)



b)

Figura 3.5 - Moldagem de provetes prismáticos (40x40x160 mm) das argamassas da série *Durabilidade* no compactador automático. a) Compactador automático com caixa aberta. b) Compactador automático com caixa fechada durante a compactação.

Após o enchimento e compactação dos moldes prismáticos, estes foram colocados na câmara de cura (Figura 3.6 a)), que já se encontrava nas condições exigidas (temperatura a 20 ± 2 °C e humidade relativa de 70 ± 5 °C) durante 24 ± 2 horas após as quais foram desmoldados, com o auxílio de um martelo de madeira.

Os provetes prismáticos das argamassas da série de argamassas *Durabilidade* foram desmoldados, identificados, pesados e levados para a câmara de cura onde ficaram totalmente imersos em água potável à temperatura de 20 ± 1 °C (Figura 3.6 b)). Conforme a norma, a água teve acesso livre a todas as faces dos provetes. A duração do tempo de imersão dos provetes varia consoante o tipo de ensaio realizado (capítulo 3.5).

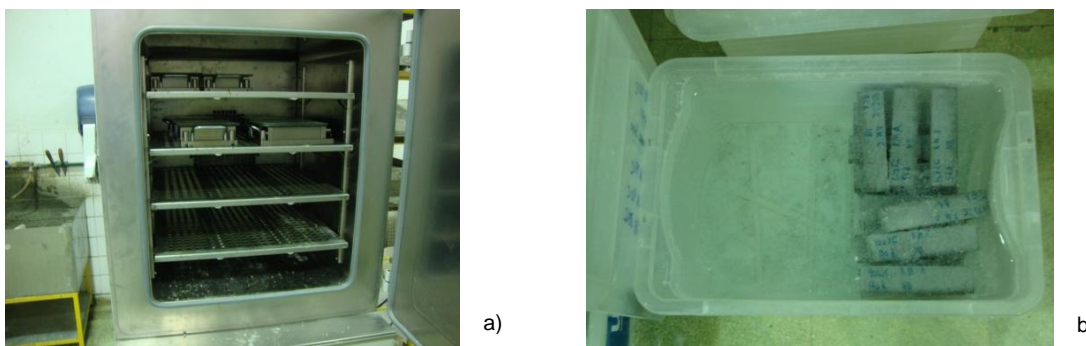


Figura 3.6 - Condicionamento e cura dos provetes das argamassas da série *Durabilidade* e da série *RAS*. a) Moldes (40x40x160 mm e 25x25x250 mm) na câmara de cura. b) Imersão dos provetes (40x40x160 mm) da série de argamassas *Durabilidade*.

❖ Povetes de ensaio de absorção capilar

Para este procedimento utilizou-se a mesa vibratória, a colher de metal, o martelo de madeira, as ripas, o plástico, o pincel, a bitola, a peça de madeira, o marcador e o óleo mineral.

Nesta mesma campanha recorreu-se à utilização de provetes cilíndricos com 25 mm de altura e 100 mm de diâmetro, que foram utilizados para os ensaios de absorção capilar (secção 3.5.2.2). No seu enchimento, foi necessário o auxílio de uma segunda pessoa para segurar o molde que já se encontrava sobre a mesa vibratória (Figura 3.7 a)). A frequência de vibração foi de 4 MHz durante 45 segundos. O enchimento foi feito com o auxílio de uma bitola para se certificar a altura de 25 mm (Figura 3.7 b)). Por fim, com a ajuda de uma peça de madeira, foram rebentadas as bolhas que se formaram à superfície devido à vibração (Figura 3.7 c))

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

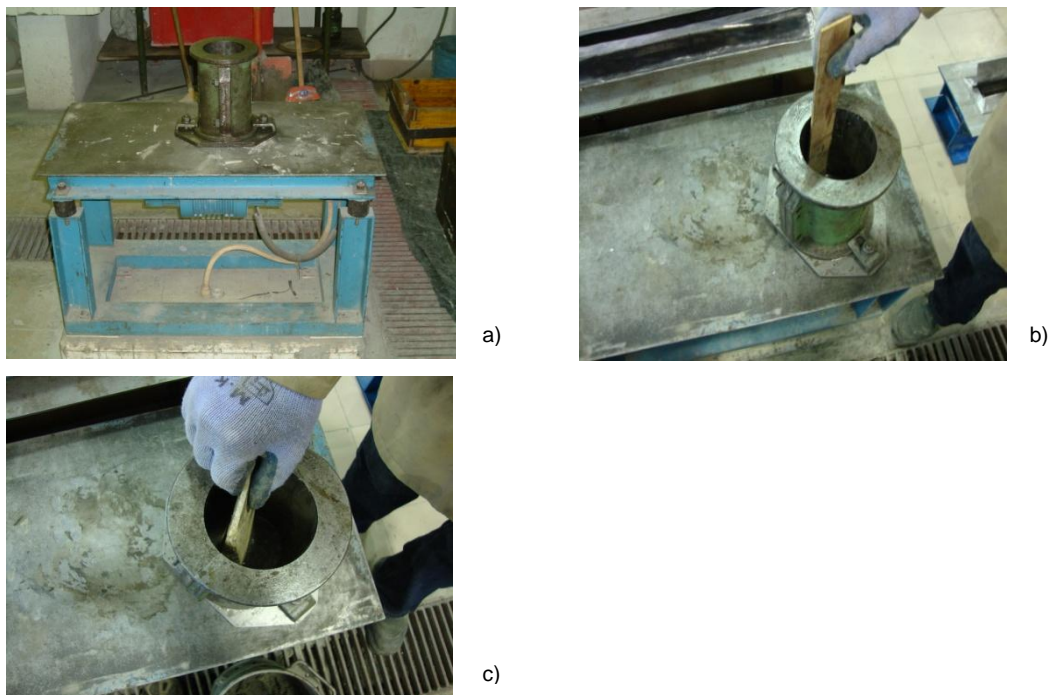


Figura 3.7 - Moldagem de provetes cilíndricos (25 mm de espessura e 100 mm de diâmetro, e 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro) das argamassas da série *Durabilidade*. a) Mesa vibratória com o molde cilíndrico. b) Para os provetes cilíndricos com 25 mm de espessura a medição do enchimento da altura de argamassa é feita com o auxílio de uma bitola. c) Alisamento da superfície dos provetes de 25 mm de espessura com recurso a uma peça de madeira.

Após o seu enchimento e compactação, os provetes foram levados para uma sala com temperatura de 20 ± 2 °C e para se evitar a perda de humidade os moldes cilíndricos foram cobertos com um plástico por cima do qual eram colocados ripas para evitar que os provetes ficassem a descoberto (Figura 3.8 a)).

Por fim, foram desmoldados, identificados, pesados e levados para a câmara de cura onde ficaram totalmente imersos em água potável à temperatura de 20 ± 1 °C. A água teve acesso livre a todas as faces dos provetes (Figura 3.8 b)). A quantificação do tempo de imersão dos provetes encontra-se na secção 3.5.2.2.

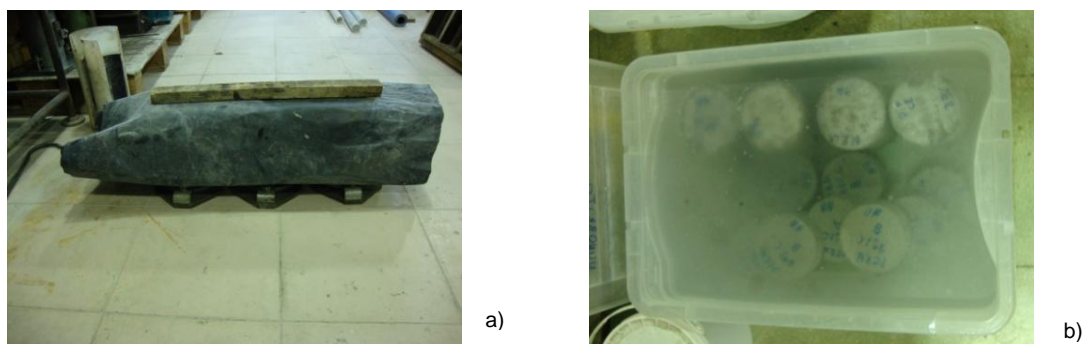


Figura 3.8 - Condicionamento e cura dos provetes da série de argamassas *Durabilidade*. a) Cura dos provetes cilíndricos, nos moldes, coberta com o plástico e ripas. b) Imersão dos provetes (25 mm de espessura e 100 de diâmetro e 50 mm de diâmetro) da série de argamassas *Durabilidade*.

❖ Povetes de difusão de cloretos em regime não estacionário e permeabilidade ao oxigénio

Para este procedimento utilizou-se a mesa vibratória, a colher de metal, o martelo de madeira, as ripas, o plástico, o pincel, o marcador e o óleo mineral.

Nesta mesma campanha recorreu-se à utilização de provetes cilíndricos com 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Estes provetes foram utilizados nos ensaios de difusão de cloretos em regime não estacionário (secção 3.5.2.4) e de permeabilidade ao oxigénio (secção 3.5.2.6). No seu enchimento, foi necessário o auxílio de uma segunda pessoa para segurar o molde, já sobre a mesa vibratória (Figura 3.7 a)), em vibração durante o enchimento dos moldes. A frequência de vibração foi de 4 MHz durante 45 segundos.

Após o enchimento completo do molde (200 mm) e a compactação do mesmo, foram levados para uma sala com temperatura de 20 ± 2 °C onde, para se evitar a perda de humidade, os moldes cilíndricos foram cobertos com um plástico em cima do qual eram colocadas ripas para evitar que os provetes ficassem a descoberto (Figura 3.8 a))

Por fim, os provetes foram desmoldados, identificados, pesados e levados para a câmara de cura onde ficaram imersos em água potável à temperatura de 20 ± 1 °C (segundo a norma, a água teve acesso livre a todas as faces dos provetes (Figura 3.8 b))). A quantificação do tempo de imersão dos provetes encontra-se na secções 3.5.2.4 e 3.5.2.6.

3.4 Ensaios no estado fresco

Os ensaios no estado fresco foram realizados logo após a amassadura. Considera-se que os materiais à base de cimento estão no estado fresco durante o período temporal em que apresentam comportamento plástico [114]. A plasticidade é a propriedade que permite que a argamassa se deforme e permaneça deformada após ter sido submetida a tensões. Está diretamente ligada à sua consistência, à sua coesão e à retenção de água. Esta propriedade é influenciada pelo teor de ar incorporado, pela natureza e teor de ligante pelo tipo e teor das adições, pela eficiência da mistura e pela quantidade de água [115, 116].

A sequência de elaboração dos ensaios bem como a metodologia dos ensaios foi a mesma para as amassaduras das argamassas da série de argamassas RAS e da

série de argamassas *Durabilidade*. Iniciou-se cada plano de ensaios, das duas séries de argamassas, com o ensaio de determinação da consistência por espalhamento.

3.4.1 Consistência por espalhamento

A determinação da consistência por espalhamento baseia-se na determinação da deformação da argamassa quando sujeita a forças exteriores avaliando, assim, a trabalhabilidade das argamassas.

Nesta campanha experimental foram realizados ensaios para as argamassas da série de argamassas *RAS* e da série de argamassas *Durabilidade* de acordo com as normas ASTM C1437-07 [117] e ASTM C230-90 [118].

3.4.1.1 Ensaios de espalhamento de acordo com a ASTM C1437-07

Neste ensaio, recorreu-se à utilização do molde tronco-cónico com 110 mm de base e 70 mm de altura, da mesa de espalhamento, dum colher de sopa, dum cronómetro, dum pano seco, dum pilão de madeira, dum colher de pedreiro e dum paquímetro. No procedimento adotado, centra-se o molde na mesa de espalhamento e, com o auxílio de uma colher, colocou-se a argamassa no molde até meio da sua capacidade e procedeu-se à compactação com um pilão, calcando 10 vezes a argamassa. Após ter completado o enchimento do molde (Figura 3.9 a)) repetiu-se a operação de compactação. Tendo-se completado este processo, retirou-se a argamassa em excesso, rasando-se ao nível do molde o excesso de argamassa com uma colher de pedreiro. Submeteu-se a mesa de espalhamento a 15 pancadas (em 15 segundos), com frequência constante.

Por fim, utilizou-se um paquímetro (Figura 3.9 b)) para medir o diâmetro de espalhamento (D_m) da argamassa, segundo três eixos, que se encontravam marcados na mesa de espalhamento, sendo resultado do ensaio – a média aritmética das três leituras efetuadas.

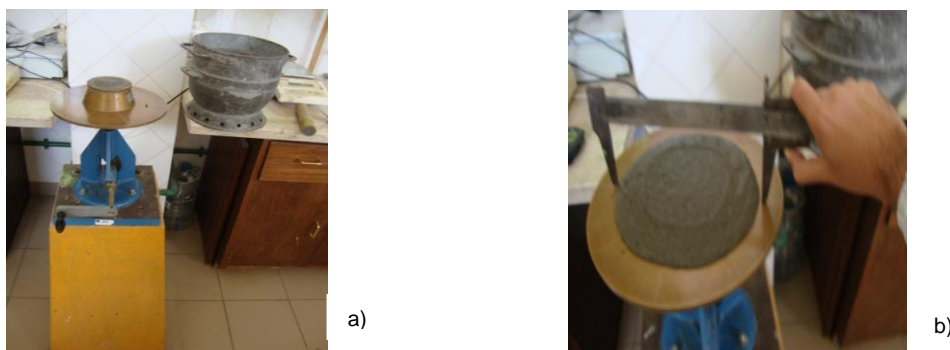


Figura 3.9 - Ensaio de consistência por espalhamento (estado fresco) para as argamassas da série *Durabilidade* e da série *RAS*. a) Molde tronco-cônico preenchido com argamassa. b) Medição do diâmetro de espalhamento da argamassa, numa das três direções, com auxílio de um paquímetro.

3.4.1.2 Ensaio de espalhamento de acordo com a ASTM C230-90

Neste ensaio, recorreu-se à utilização do molde tronco-cônico (com as dimensões iguais ao da norma ASTM C1437-07 [117]) e mesa de espalhamento, dum colher de sopa, dum cronómetro, dum pano seco, dum pilão de madeira, dum colher de pedreiro e dum paquímetro. Os procedimentos descritos na secção 3.4.1.1 são repetidos até ao momento em que o molde é retirado, sendo a argamassa submetida a 25 pancadas em 15 segundos, a frequência constante. Recorreu-se a um paquímetro (Figura 3.9 b)) para medir o diâmetro de espalhamento (D_m), sendo esta medição efetuada segundo 3 eixos marcados na mesa de espalhamento. O valor da consistência por espalhamento foi determinado pela média das três leituras, sendo o valor final expresso em percentagem.

3.4.2 Massa volúmica

A massa volúmica de uma argamassa no estado fresco define-se como o quociente entre a massa de argamassa que está no recipiente e o volume que esta ocupa. Nesta campanha experimental o método de ensaio adotado foi o mesmo para as argamassas da série de argamassas *RAS* e da série de argamassas *Durabilidade* de acordo com a norma NP EN 12350-06 [119].

No procedimento seguido utilizou-se uma balança, uma colher, um recipiente de volume conhecido (Figura 3.10 a)), papel absorvente e uma placa de vidro (Figura 3.10 b)). Após limpar o recipiente (Figura 3.10 c)), com papel absorvente, e pesar-se, procedeu-se ao enchimento do mesmo que foi composto por duas fases. A sua compactação foi feita com o auxílio de um martelo de borracha com o qual foram aplicadas 15 pancadas ao redor de todo o recipiente. Após a regularização da

superfície, recorrendo a uma placa de vidro (Figura 3.10 d)), procedeu-se à pesagem do conjunto (recipiente e argamassa).

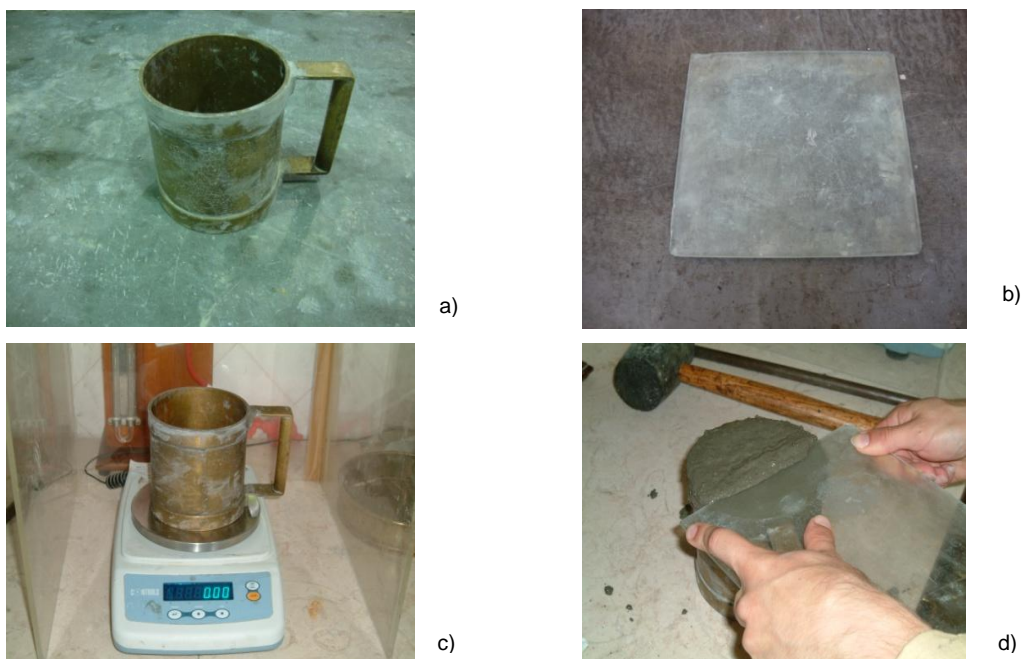


Figura 3.10 - Ensaio de determinação da massa volúmica (estado fresco) para as argamassas da série *Durabilidade* e da série *RAS*. a) Recipiente utilizado na medição da massa volúmica, b) Placa de vidro utilizada na regularização da superfície da argamassa no recipiente. c) Pesagem do recipiente. d) Regularização da superfície da argamassa.

A expressão (Eq. 3.1) permite calcular a massa volúmica fresca:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

ρ – Massa volúmica da argamassa fresca (kg/m^3);

m_1 – Massa do recipiente (kg);

m_2 – Massa do conjunto do recipiente com argamassa (kg);

V – Volume do recipiente (m^3).

3.4.3 Teor de ar

O ensaio de determinação do teor de ar na argamassa fresca tem por base a variação do volume de uma argamassa originado por um aumento de pressão. Nesta campanha experimental o método de ensaio descrito foi o mesmo para as argamassas da série de argamassas *RAS* e da série de argamassas *Durabilidade* de acordo com na norma ASTM C231-09 [120].

Utilizou-se o aerómetro (Figura 3.11 a)), a colher de metal, papel absorvente, o pilão, o martelo de borracha, a placa de vidro e água destilada. O método seguido na elaboração deste ensaio consistiu em encher o recipiente com argamassa em duas camadas. Após a primeira camada e com recurso a um pilão, foi feita a sua compactação aplicando-lhe 25 pancadas. De modo a evitar que a argamassa ficasse com algumas bolhas de ar no seu interior, resultantes da compactação com o pilão, recorreu-se a um martelo de borracha (Figura 3.11 b)) com o qual se deram algumas pancadas no recipiente. Estes procedimentos foram repetidos para a segunda camada. Rasou-se a superfície do recipiente com uma placa de vidro (Figura 3.11 c)), para remover o excesso de argamassa, e fechou-se o recipiente de modo a que a campânula ficasse despressurizada. As válvulas laterais foram abertas, acionando a válvula correspondente. Em seguida, introduziu-se água no seu interior de modo a que o sistema ficasse selado hidricamente. Fecharam-se as válvulas e aumentou-se a pressão dentro do recipiente, por bombeamento da válvula introdutora, até que o ponteiro ultrapassasse a marca vermelha em cerca de 10 mm. Este ensaio terminou com a abertura da válvula de descompressão, até que o ponteiro do mostrador do aerómetro estabilizasse, permitindo assim a leitura do valor da percentagem de ar contida na argamassa, registando-a em seguida.



a)



b)



c)

Figura 3.11 - Ensaio de determinação do teor de ar (estado fresco) das argamassas da série *Durabilidade* e da série *RAS*. a) Equipamento utilizado na determinação do teor de ar - aerómetro. b) Martelo de borracha utilizado na compactação. c) Regularização da superfície da argamassa no recipiente, recorrendo a uma placa de vidro.

3.5 Ensaios no estado endurecido

3.5.1 Série de argamassas RAS – Reação álcalis-sílica acelerada

O ensaio de reação álcalis-sílica acelerada tem como base o estudo da expansão dos provetes ensaiados, originada pela reação entre iões alcalinos do cimento e a sílica reativa presente no agregado. O procedimento adotado na determinação da reação álcalis-sílica desta campanha experimental baseou-se nas normas americanas ASTM C1260-07 [112] e ASTM C490-09 [121].

Na realização do ensaio de determinação de reação álcalis-sílica acelerada recorreu-se à utilização de uma estufa (MEMMERT), um deflectómetro (Mitsutoyo absolute), um pano, 4 recipientes, hidróxido de sódio e água.

Após a preparação da argamassa, a moldagem, desmoldagem e identificação das argamassas da série RAS (secção 3.3.1.1 e 3.3.1.2), foi realizada uma leitura dos seus comprimentos iniciais com um deflectómetro (Figura 3.12 a)).

A leitura foi efetuada colocando o provete no deflectómetro e submetendo-o a uma rotação sobre si mesmo. Este processo tem como finalidade limpar algumas impurezas que possam existir entre os pernos dos provetes e os sensores de leitura do deflectómetro, evitando assim possíveis erros de leitura. Após a leitura do comprimento inicial dos provetes, estes foram colocados em recipientes fechados com água (previamente aquecida) numa estufa (Figura 3.12 b)) a uma temperatura de 80 ± 1 °C.

Após 24 horas de cura húmida a 80 ± 1 °C, os provetes foram removidos um a um, dos respetivos recipientes, e a sua superfície seca com um pano. Foi efetuada uma segunda leitura – leitura inicial de referência - e os provetes foram colocados sobre um pano (Figura 3.12 c)). Depois de todas as leituras efetuadas colocaram-se os provetes em recipientes com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH 1N) (Figura 3.12 d)) previamente aquecido e de modo a ficarem totalmente imersos na solução. Os recipientes foram fechados e introduzidos de novo na estufa a uma temperatura de 80 ± 1 °C.

Nos 14 dias que se seguiram foram efetuadas 5 medições de comprimento dos provetes, aproximadamente à mesma hora. Os provetes foram retirados dos respetivos recipientes, limpos com um pano, e efectou-se a leitura e voltou-se a

coloca-los novamente no recipiente. Decorridos 16 dias desde o início do ensaio, e de acordo a norma, prolongada até aos 30 dias, (período durante o qual foram efetuadas pelo menos uma leitura por semana). O plano de leituras adotado para este ensaio, encontra-se sistematizado na Figura 3.13.

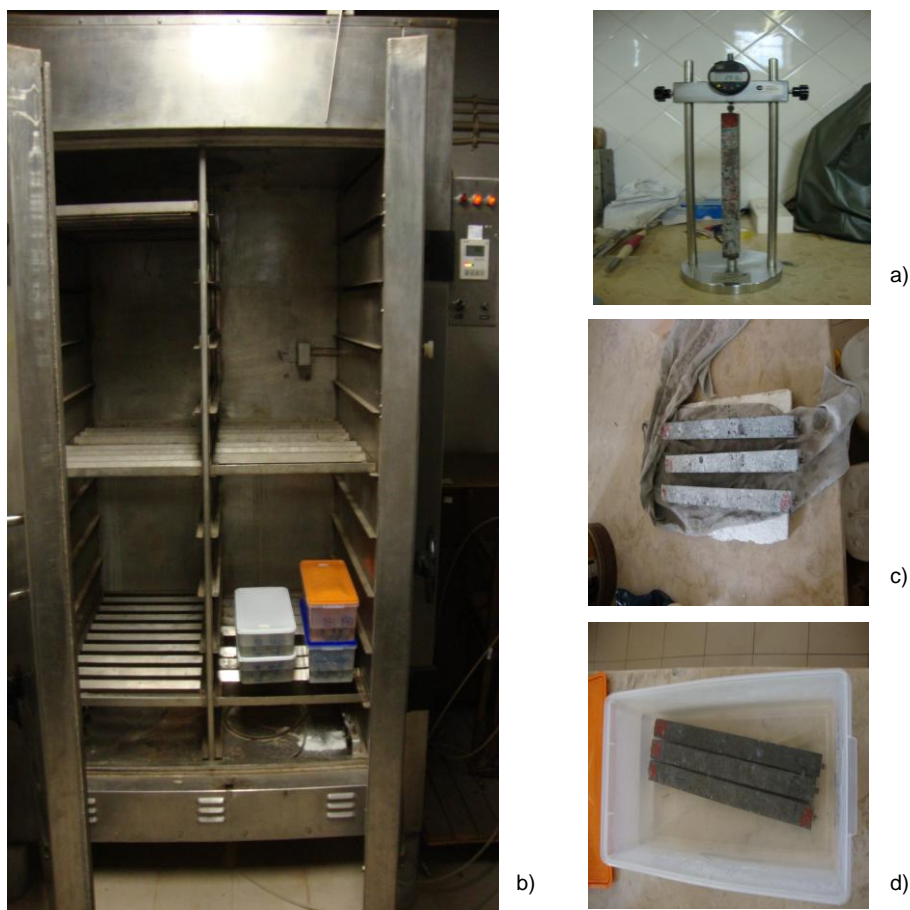


Figura 3.12 - Ensaio de determinação da reação alcalis-silica acelerado das argamassas da série RAS. a) Deflectómetro utilizado na medição de comprimento do provete. b) Acondicionamento dos recipientes na estufa. c) Limpeza do excesso da solução de hidróxido de sódio (NaOH), antes de se proceder à medição. d) Recipientes com os provetes imersos em, hidróxido de sódio (NaOH).

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Idade das Argamassas (dias)		Designação adotada para as leituras de comprimento efetuadas		Cronologia assumida no estudo da RAS (dias)
Amassadura				
1d (camara de cura)		L ₋₁		
2d (1 dia de cura em água a 80°C)		L ₀		0d
Provetes imersos em solução NaOH a 80°C	3d	L ₁		1d
	6d	L ₂		4d
	8d	L ₃		6d
	10d	L ₄		8d
	13d	L ₅		11d
	16d	L ₆		14d
	20d	L ₇		18d
	24d	L ₈		22d
30d	L ₉		28d	

d - dias

Figura 3.13 - Plano de leituras sistematizado para o ensaio das argamassas da série RAS de acordo com a ASTM C1260-07 [112].

Na determinação do comprimento dos provetes correspondentes à mesma composição foi feita uma média com os valores das leituras efetuadas (no mesmo dia). Recorreu-se à equação 3.2, calculou-se a diferença entre o comprimento L₀ e o comprimento correspondente ao dia em que foi efetuada a leitura L_i. Cada leitura é feita com uma aproximação de 0,001% relativamente ao comprimento do provete no molde (250 mm).

$$Expansão(\%) = \left(\frac{L_i - L_0}{L_P} \right) \times 10 \quad (\text{Eq 3.2})$$

onde:

L_P – Comprimento do provete no molde (L=250 mm);

L₀ – Comprimento dos provetes (médio) para argamassas com 2 dias, que se considera o tempo inicial do estudo de expansão (mm);

L_i – Comprimento dos provetes (médio) ao longo do ensaio (mm).

3.5.2 Série de argamassas *Durabilidade*

3.5.2.1 Resistência mecânica à flexão e à compressão

A determinação da resistência mecânica das argamassas tanto da resistência à flexão como à compressão, foi realizada segundo a norma NP EN 196-1 [62].

Na realização do ensaio de determinação da resistência mecânica recorreu-se à utilização de uma máquina Form+Test (Figura 3.14 a)).

Após a preparação da argamassa, da moldagem, desmoldagem e identificação dos provetes das argamassas da série de argamassas *Durabilidade* (secção 3.3.2.1 e 3.3.2.2), e de acordo com norma, os provetes foram curados (temperatura a 20 ± 2 °C e com humidade relativa de $70\pm 5\%$), durante 2, 7, 28, 56 e 91 dias. No ensaio de resistência à flexão o provete foi centrado entre os cilindros de apoio da prensa sendo as faces moldagem as faces de ensaio (face que durante o enchimento do molde fica exposta e que é rasada com a régua metálica). Submeteu-se então o prisma à aplicação duma carga (Figura 3.14 b)) gradualmente crescente e contínua, a uma velocidade de 0,57 kN/s e centrada a meio vão do provete. Quando este atingiu a rotura, registou-se o valor da força de rotura à flexão.

A expressão (Eq. 3.3) que permite calcular a tensão de rotura à flexão é:

$$R_f = 1,5 \times \frac{F_f \times l}{b \times d^2} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde:

R_f – Resistência à flexão (MPa ou N/mm²);

F_f – Força de rotura à flexão (N);

l – Distância entre apoios (mm);

b – Largura do prisma (mm);

d – Espessura do prisma (mm).

De cada um dos provetes submetidos ao ensaio de resistência à flexão resultaram dois meios prismas que foram utilizados para os ensaios de resistência à compressão.

No ensaio de determinação da resistência à compressão as metades dos prismas foram colocadas sobre a placa do prato inferior da máquina (Figura 3.14 c)) e centradas com o auxílio de uma patilha. Os restantes procedimentos foram análogos

ao ensaio de flexão: a carga utilizada foi gradualmente crescente e contínua, a uma velocidade de 2,55 kN/s até à rotura do provete, por fim registou-se o valor da última carga, obtendo-se a força de rotura à compressão.



Figura 3.14 - Ensaio de determinação da resistência mecânica das argamassas da série *Durabilidade*. a) Máquina de ensaio de resistência à compressão e flexão. b) Determinação da resistência à flexão. c) Determinação da resistência à compressão.

A expressão (Eq. 3.4) que permite calcular a tensão de rotura à compressão é:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

onde:

R_c – Resistência à compressão (MPa ou N/mm²);

F_c – Força de rotura à compressão (N);

A – Área de aplicação da carga (mm²).

3.5.2.2 Determinação do módulo de elasticidade à compressão

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade à compressão, foi realizado com base na norma EN 13412 [122].

Na realização deste ensaio utilizou-se a máquina de ensaio de resistência mecânica (Form+Test), a máquina de ensaio de elasticidade (HP75000), os sensores, a régua metálica e o papel absorvente.

Após a preparação da argamassa, moldagem, desmoldagem e identificação dos provetes da série de argamassas Durabilidade (secção 3.3.2), os provetes, com 28 dias de cura húmida, foram removidos da câmara de cura, limpos com papel absorvente para retirar o excesso de água e colocados numa bancada a secar durante 24 horas.

Na máquina de ensaio de resistência mecânica foi utilizado um espaçador metálico (Figura 3.14 c)) para aproximar o provete da parte superior da prensa (visível na Figura 3.15 a)). A máquina de resistência mecânica (Figura 3.15 b)) foi programada para 6 ciclos – tendo cada ciclo a duração de 2 minutos. No fim do 1º minuto registaram-se as deformações causadas pela tensão mínima (σ_1) - 0,5 N/mm² como especificado pela norma EN 13412. Ao fim do 2º minuto registou-se as deformações causadas pela tensão máxima (σ_2) - 1/3 da tensão de rotura à compressão como especificado pela norma EN 13412, determinada com base na média aritmética dos valores registados no ensaio de resistência mecânica à compressão aos 28 dias de idade para cada composição de argamassas ensaiada no capítulo 3.5.2.1. O equipamento – HP 75000 regista as deformações (Figura 3.15 c)) através de dois transdutores de indução ajustados a duas das faces (A e B) do provete, quando este se encontra submetido a cargas de compressão. A face de enchimento (face que durante o enchimento do molde fica exposta e que é rasada com a régua metálica) do provete, devido à sua irregularidade, e por consequência a face oposta não podem ser utilizadas para medições de deformações com os transdutores de indução. A designação de face A e face B foi atribuída, aleatoriamente, a uma das outras faces. Os transdutores de indução (Figura 3.15 a)) medem as deformações referentes a uma base de medida selecionada, de 50 mm no centro do provete. Os transdutores de indução foram colocados a 55 mm de ambas as extremidades do provete e, o mais centrado possível, para que as leituras fossem coerentes.



a)



b)



c)

Figura 3.15 – Ensaio de módulo de elasticidade das argamassas da série *Durabilidade*. a) Painel de controlo pertencente à máquina de ensaios de resistência mecânica a qual possibilita a programação do nº de ciclos e respetivas forças de compressão. b) HP 75000 que permite registar as deformações. c) Transdutores de indução que permitem a leitura das deformações.

Os primeiros três ciclos serviram para preencher os vazios (não para avaliar a deformação das argamassas). Os valores das deformações dos provetes referentes aos 4º, 5º e 6º ciclos foram registados para serem usados no cálculo do módulo de elasticidade (Eq. 3.5, 3.6, 3.7):

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 \text{ (MPa)} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

onde:

σ_2 – Tensão máxima (1/3 da tensão de rotura à compressão);

σ_1 – Tensão mínima (0,5 N/mm²);

$$\Delta\varepsilon = \frac{l_b - l_a}{BM} \times 10^2 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

onde:

l_b – Média das deformações na face B (mm);

l_a – Média das deformações na face A (mm);

BM – Base de medida de 50 mm.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^3 \text{ (GPa)} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

onde:

E – Módulo de elasticidade (GPa)

3.5.2.3 Absorção capilar

O ensaio de absorção capilar, foi realizado com base na norma NP EN 13057 [123]. Neste estudo, os provetes de ensaio resultam de discos moldados individualmente, com 100 mm de diâmetro e 25 mm de espessura.

Na realização do ensaio de determinação da absorção capilar recorreu-se à utilização da estufa (RMU), da balança, do tabuleiro de aço inoxidável, de varetas de vidro (2 mm de diâmetro), de papel absorvente, duma pipeta e água.

Após a preparação da argamassa, moldagem, desmoldagem e identificação dos provetes da série de argamassas Durabilidade (secção 3.3.2), os provetes foram curados a 20 ± 2 °C e à HR de 70 ± 5 %. Depois de um período de cura de 28 dias, os provetes foram colocados numa estufa com ventilação, à temperatura de 40 ± 2 °C durante 7 dias até o peso se manter constante. Considera-se que o peso está constante quando apresenta uma variação inferior a 0,2% em 2 horas. Os provetes foram retirados da estufa e colocados numa sala condicionada, com temperatura de 21 ± 2 °C e HR de $60\pm 10\%$ durante 24 horas. Em seguida, foram colocados num tabuleiro de inox (Figura 3.16 a)), no qual se encontravam varetas de vidro de 2 mm de diâmetro espaçadas entre elas, de modo a evitar o contato direto da face inferior do provete com o fundo do tabuleiro, aumentando assim a superfície de absorção. A água dentro do tabuleiro tinha uma altura de 4 mm, de modo a vencer o diâmetro das varetas e garantir que a base dos provetes ficasse imersa em água até uma altura de cerca de 2 ± 1 mm. A avaliação da quantidade de água absorvida pelos provetes, durante o ensaio, foi feita através de pesagens efetuadas ao fim de: 12 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas e 24 horas. De salientar, que imediatamente após a remoção dos provetes da água, estes foram colocados sobre papel absorvente de modo a retirar todo o excesso de água e só depois foram pesados (Figura 3.16 b)).



a)



b)

Figura 3.16 – Ensaio de determinação da absorção capilar das argamassas da série *Durabilidade*. a) Colocação dos provetes no tabuleiro sob as varetas de vidro. b) Pesagem dos provetes após ser retirado o excesso de água com papel absorvente.

Elaborou-se um gráfico para determinar o coeficiente de absorção capilar. A curva de absorção capilar expressa a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do provete (kg/m^2), em função da raiz quadrada do tempo ($\text{h}^{0.5}$). O coeficiente de absorção capilar é determinado com base no gradiente de uma reta que pode ter três formas distintas de acordo com os resultados obtidos.

A expressão (Eq. 3.8) permite o cálculo da captação de água por unidade de área:

$$l = \frac{W}{A} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

onde:

l – Captação de água por unidade de área (kg/m^2);

W – Peso total do provete e a respectiva água absorvida pelo mesmo (g);

A – Área provete em contato com a água (m^2).

3.5.2.4 Difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH)

O ensaio de difusão de cloretos em regime não estacionário, foi realizado de acordo com a especificação LNEC E 463 [124].

Na realização deste ensaio utilizou-se um exsiccador, uma trompa de vácuo, um reservatório catódico Engels, uma manga de borracha, uma braçadeira, um ânodo, um termómetro, uma fonte de alimentação Tenma, dois panos, um tabuleiro, um paquímetro digital, hidróxido de cálcio, cloreto de sódio, hidróxido de sódio, nitrato de prata.

Após a preparação da argamassa, moldagem, desmoldagem e identificação dos provetes da série de argamassas Durabilidade (secção 3.3.2), os provetes foram colocados em cura durante 20 dias. Procedeu-se, então, ao corte dos cilindros (com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura), cortando primeiramente 25 mm de cada extremidade e, por fim, cortou-se o provete em três partes iguais de 50 mm de espessura. Depois de cortados, os provetes foram colocados num exsiccador (Figura 3.17 a)) em vácuo durante três horas, tendo-se passado este tempo, enchido o exsiccador com uma solução saturada composta (água destilada e hidróxido de cálcio) e mantido em vácuo durante uma hora. Ao fim de uma hora deixou-se entrar o ar no exsiccador, mantendo-se os provetes nessa mesma solução durante 18 ± 2 horas.

Enquanto os provetes se encontravam no exsiccador, preparou-se a solução catódica (solução aquosa de 10% de cloreto de sódio (NaCl)) e a solução anódica (constituída por 1,2% de hidróxido de sódio (NaOH)). Depois de retirar os provetes do exsiccador, estes foram colocados nas mangas de borracha (Figura 3.17 b)), com duas braçadeiras de aço inoxidável (Figura 3.17 c)), ajustando-se os provetes numa das extremidades das mangas de borracha, de forma a não permitir que a solução anódica contaminasse a solução catódica e que esta estivesse apenas em contato com as faces inferiores dos provetes. No interior da manga, sobre a face superior de cada um dos provetes, colocou-se 300 ml de solução anódica. Em seguida, colocaram-se as mangas com os provetes no suporte de plástico (Figura 3.17 d) e f)) do reservatório catódico (Figura 3.17 e)), onde se tinha colocado previamente 12 litros de solução catódica, e submergiram-se os ânodos na solução anódica (Figura 3.17 g)) presente em cada uma das mangas. Tanto os provetes como as soluções foram mantidos à temperatura ambiente de 20 a 25 °C.

Ligou-se a fonte de alimentação (Figura 3.17 h)) e procedeu-se ao ajuste da diferença de potencial (d.d.p.), sendo este ajuste efetuado de forma a evitar que a corrente elétrica fosse excessivamente intensa, provocando assim o alastramento de cloretos por todo o provete, o que impossibilitaria a medição da profundidade de penetração dos cloretos. Caso a corrente elétrica seja diminuta, a profundidade de penetração dos cloretos é baixa dificultando ou inviabilizando a medição da profundidade. No ensaio realizado optou-se por uma tensão de 10 V o que implica uma duração de 24 horas.

Após o ajuste da d.d.p. a aplicar, registou-se a temperatura (Figura 3.17 i)) da solução anódica e a intensidade da corrente, antes de se iniciar o ensaio e após o término deste.

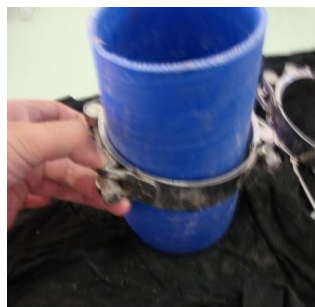
Decorridas 24 horas, desligou-se a corrente, removeu-se a manga do reservatório, deixou-se a escorrer a solução catódica que se encontrava no exterior da manga e nas braçadeiras para o reservatório catódico. Em seguida despejou-se a solução anódica que se encontrava no interior da manga para uma proveta, desapertaram-se as braçadeiras e removeu-se o provete da manga. Limpou-se o excesso de soluções anódica e catódica do provete com dois panos, tendo o cuidado de não trocar os panos para não haver contaminação de cloretos nas faces dos provetes.

Ao transportar os provetes até à prensa, houve o cuidado de não deixar que a face que havia sido alvo de ataque dos cloretos (Figura 3.17 j)) tivesse contato com nenhuma outra face, a não ser do mesmo tipo. O provete foi colocado na posição

vertical na prensa (Figura 3.17 k)) e aplicou-se uma força de compressão diametral que dividiu o provete em duas partes. A superfície fraturada do provete foi pulverizada com nitrato de prata (AgNO_3) (Figura 3.17 l)). Após 20 minutos uniram-se as superfícies dos provetes que continham cloretos e mediu-se a profundidade de penetração dos cloretos em 5 pontos distintos dos provetes com recurso a um paquímetro digital (Figura 3.17 m)). Considerou-se a profundidade de penetração de cloretos como sendo a média aritmética dos valores destas leituras.



a)



b)



c)



d)



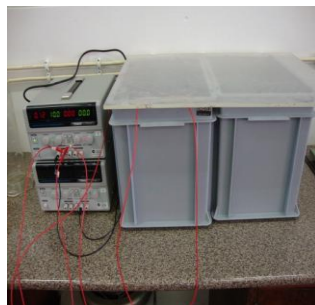
e)



f)



g)



h)

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

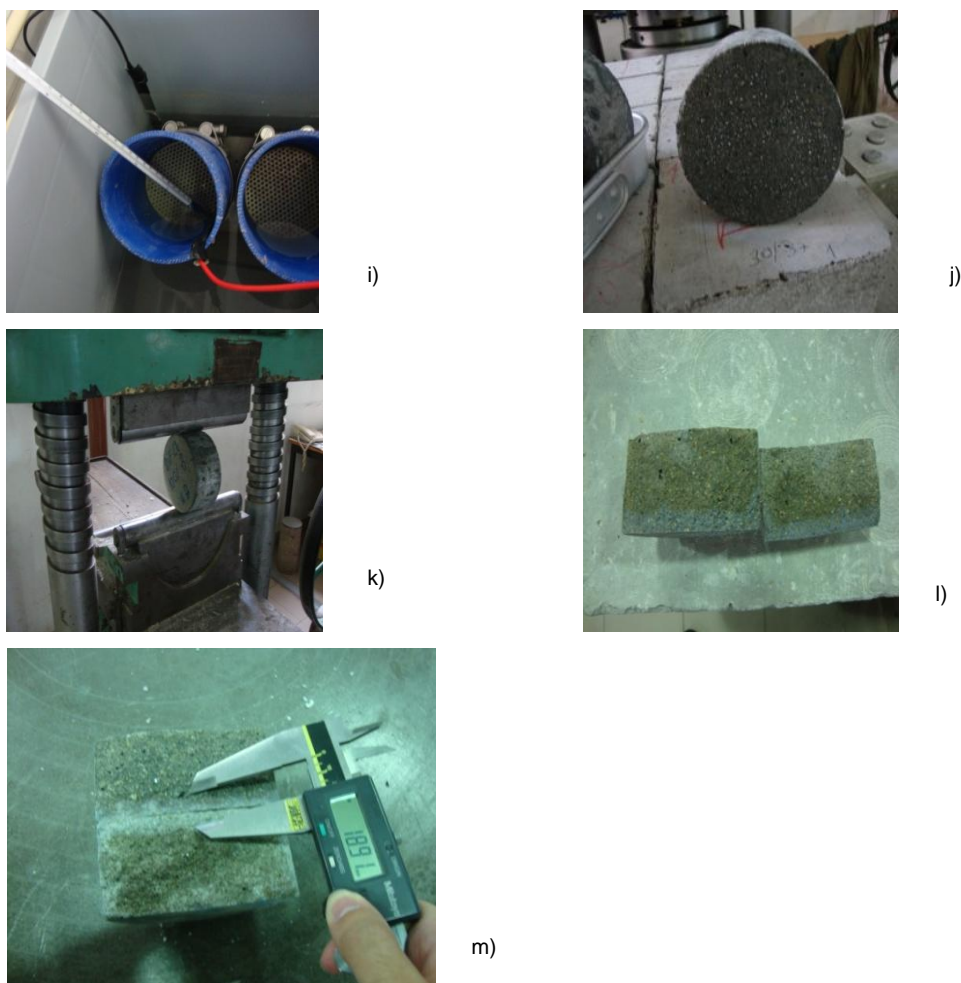


Figura 3.17 – Ensaio de difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH) das argamassas da série *Durabilidade*. a) Provetes no exsiccador em vácuo imersos numa solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) . b) Colocação do provete cilíndrico e braçadeira na manga.c) Manga com duas braçadeiras de aço inoxidável. d) Suporte de plástico no interior do reservatório catódico. e) Reservatórios catódicos. f) Mangas colocados sobre o suporte de plástico no interior do reservatório catódico. g) Mangas com os provetes no seu interior, que se encontram no reservatório catódico com os ânodos já colocado. h) Fonte de alimentação utilizada no ensaio da difusão de cloretos em regime não estacionário. i) Termómetro colocado no interior da manga por cima do ânodo. j) Observação dos cloretos na superfície do provete. k) Colocação do provete na prensa. l) Provette pulverizado com a solução de nitrato de prata. m) Medição da profundidade de cloretos recorrendo a utilização de um paquímetro digital.

O coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário é determinado recorrendo à equação (Eq. 3.9):

$$D = \frac{0,0239 \times (273+T) \times L}{(U-2) \times t} \times \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T) \times L \times x_d}{U-2}} \right) \quad (\text{Eq. 3.9})$$

onde:

D – Coeficiente de difusão no estado não estacionário ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);

U – Valor da voltagem aplicada (V);

T – O valor médio de variação da temperatura inicial e final na solução anódica ($^{\circ}\text{C}$);

L – Espessura do provete (mm);

x_d – Valor médio da profundidade de penetração (mm);

T – Duração do ensaio (h).

3.5.2.5 Resistência à carbonatação acelerada

O ensaio de resistência à carbonatação acelerada, foi realizado segundo a norma NP EN 13295 [125].

Na realização deste ensaio utilizou-se uma câmara de carbonatação Fitoclima S600 com um doseador de CO₂ Guadian, uma prensa, papel absorvente, espaçadores de plástico rígido, um tabuleiro, paquímetro digital e fenolftaleína.

Após a preparação da argamassa, moldagem, desmoldagem e identificação dos provetes da série de argamassas *Durabilidade* (secção 3.3.2) e passados 28 dias de cura húmida dos mesmos (para possibilitar a secagem dos provetes), colocaram-se as extremidades destes sobre espaçadores de plástico rígido, de modo a que a face inferior não estivesse em contato direto com a bancada (Figura 3.19 a)). Decorridos 14 dias ao ar, em ambiente controlado, com temperaturas de 21 ± 2 °C e $60 \pm 10\%$ de HR, confirmou-se que a variação de peso em 24 horas foi inferior a 2% entre o dia 13 e o dia 14.

Aos 42 dias de idade os provetes foram marcados (Figura 3.19 b)) e quebrados num dos extremos recorrendo à utilização de uma prensa (Figura 3.19 c) e d)), de modo a obter a leitura inicial de referência. Efetuaram-se as leituras pulverizando-se as secções transversais interiores quebradas com um indicador ácido/base, ou seja, com uma solução com 1 g de fenolftaleína numa solução de 70 ml de álcool e 30 ml de água desmineralizada. Este indicador adquire o tom rosa-carmim (Figura 3.19 e)) em zonas não carbonatadas em que o valor de $\text{pH} \geq 9$ e mantém-se incolor nas zonas carbonatadas onde o valor de $\text{pH} < 9$. A leitura da profundidade de carbonatação foi realizada depois de decorridos 60 ± 5 minutos após a pulverização com o indicador. A profundidade de carbonatação de cada provete foi medida perpendicularmente à superfície, com o auxílio de um paquímetro digital (Figura 3.19 f)), sendo a profundidade de carbonatação a média das leituras de profundidade de carbonatação de cada uma das quatro faces.

Efetuada a leitura inicial (referência), os provetes foram colocados na câmara de carbonatação. Para facilitar a sua remoção, nos dias de leitura, utilizou-se um tabuleiro no qual os provetes são colocados verticalmente (Figura 3.19 g)). A câmara de carbonatação encontrava-se com atmosfera de 5% de CO₂, a 21±2 °C de temperatura e com 60±10% de HR.

Nos ensaios desta campanha experimental, a profundidade de carbonatação foi lida aos 18, 28, 36, 56 e 91 dias de câmara de carbonatação (Figura 3.19 h)). Foram ensaiados três provetes, por cada composição de argamassa estudada. O plano de leituras adotado para este ensaio, encontra-se sistematizado na Figura 3.18.

Idade das Argamassas (dias)	Designação adoptada para as leituras de comprimento efetuadas	Cronologia assumida no estudo da resistência à carbonatação (dias)
Amassadura		
1d (câmara de cura)		
28d (1 dia de cura em água a 80°C)		
42d (14 dias de secagem dos provetes)	L ₀	0d
Provetes na câmara de carbonatação	60d	L ₁
	70d	L ₂
	98d	L ₃
	116d	L ₄
	133d	L ₅
d - dias		

Figura 3.18 - Plano de leituras sistematizado para o ensaio de resistência à carbonatação acelerada das argamassas da série *Durabilidade*.

Um dos requisitos exigidos pela norma é o facto da câmara de carbonatação ter uma concentração interior com 1% de CO₂. Tal não foi possível, devido a um problema no doseador de CO₂ do equipamento que apenas conseguia garantir 5% de CO₂ constante. Este fator pode ser uma das razões a que se devem as elevadas profundidades de carbonatação, que se verificaram nos resultados, que serão discutidos na secção 4.3.2.5.

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

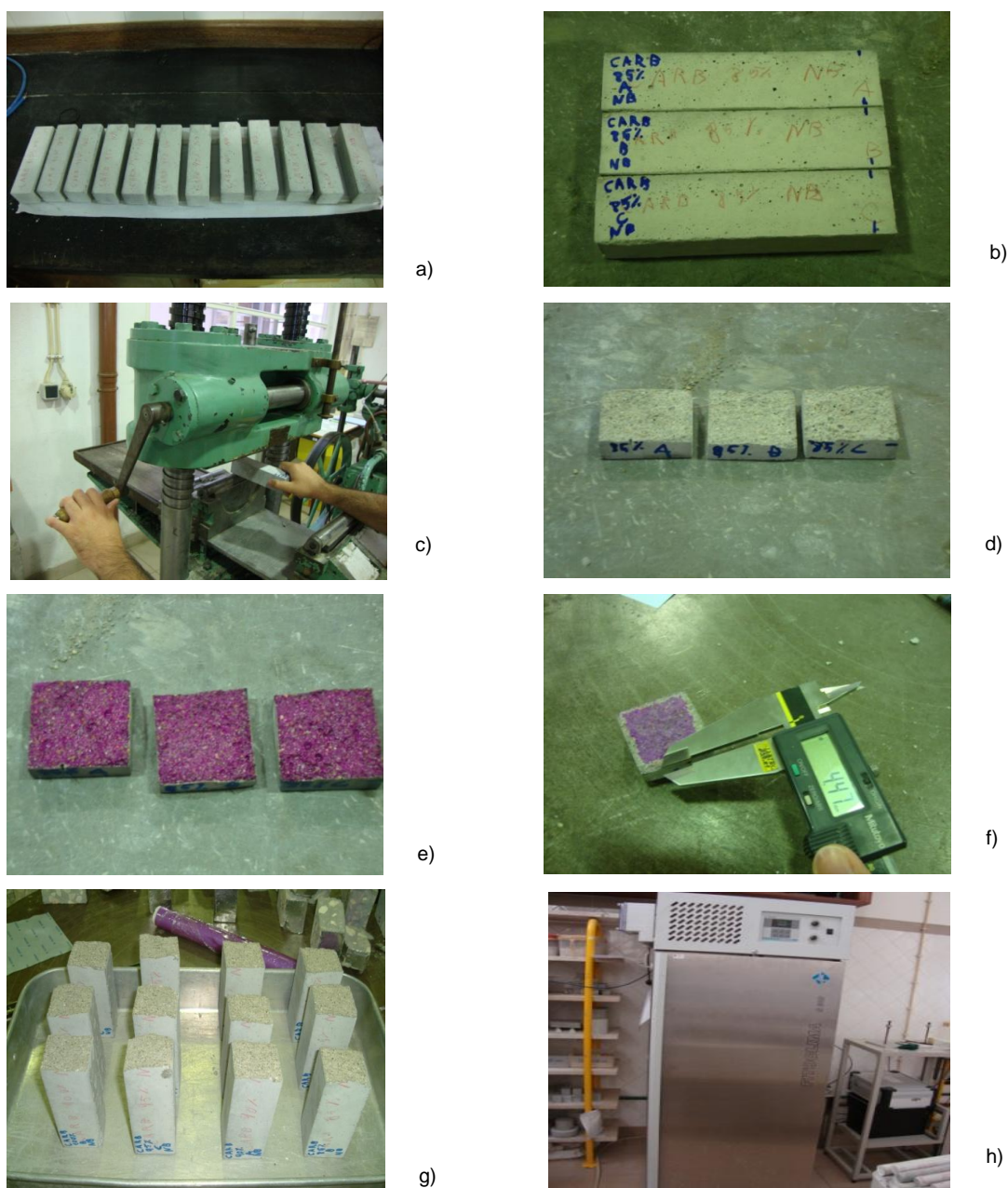


Figura 3.19 – Ensaio de determinação da resistência à carbonatação acelerada das argamassas da série *Durabilidade*. a) Secagem dos provetes apoiados em espaçadores de plástico rígido evitando que a face inferior esteja em contato com a bancada sobre papel absorvente evitando que haja água sobre a bancada. b) Marcação da área a quebrar pela prensa. c) Prensa utilizada na quebra das extremidades dos provetes. d) Extremidade dos provetes quebrados não pulverizados com fenolftaleína. e) Extremidade dos provetes quebrados pulverizados com fenolftaleína. f) Medição da profundidade de carbonatação com auxílio de um paquímetro digital. g) Tabuleiro com os provetes preparados para inserir na câmara de carbonatação. h) Câmara de carbonatação.

3.5.2.6 Permeabilidade ao oxigénio

O ensaio de permeabilidade ao oxigénio, foi realizado segundo a especificação LNEC E392 [126].

Na realização do ensaio de determinação da permeabilidade ao oxigénio recorreu-se à utilização de estufas (FIMEL), de medidores de bolhas de sabão (Martin Sommer), de

câmaras de permeabilidade ao oxigénio (Martin Sommer), de fita adesiva, de película plástica e de recipientes.

Após a preparação da argamassa, moldagem, desmoldagem e identificação dos provetes das argamassas da série de argamassas Durabilidade (secção 3.3.2), os provetes foram cortados, envolvidos lateralmente com fita adesiva (Figura 3.20 a)) e colocados a secar durante três dias numa estufa ventilada, à temperatura de 50 °C. Considerou-se que este tempo era suficiente para que os discos de argamassa atingissem uma HR, de aproximadamente 75% de acordo com o recomendado pela CEMBUREAU [127]. Os provetes foram retirados da estufa, envolvidos em película plástica (Figura 3.20 b) e Figura 3.20 c)), mantidos em caixas plásticas (Figura 3.20 d)) herméticamente fechadas e colocados pelo menos 20 dias na estufa a 50 °C (Figura 3.20 e)). Nesta campanha experimental a gestão de recursos disponíveis, fez com que os provetes estivessem na estufa 72 dias. Os provetes foram retirados da estufa, mantendo a película plástica, até atingirem uma temperatura ambiente de cerca de 20 °C. Retirou-se, então, a película plástica de cada provete, mantendo a fita adesiva lateral, e colocaram-se na câmara de permeabilidade ao oxigénio (Figura 3.20 f)). Quando se colocou o provete na câmara de permeabilidade ao oxigénio, este ficou sobre um disco que existe na mesma e foi envolvido por uma câmara-de-ar que tem como função fixar o provete. Em seguida colocou-se um outro disco sobre o provete, ambos os discos têm uma configuração igual e a sua função é distribuir o oxigénio. Fechou-se a câmara de permeabilidade ao oxigénio e encheu-se a câmara-de-ar, com uma pressão equivalente a 6 kg, recorrendo a um compressor. Por fim, ligou-se a câmara de permeabilidade ao oxigénio ao tubo que faz a distribuição do oxigénio, este por sua vez, ligou-se ao equipamento, de forma a ajustar a pressão pretendida.

A permeabilidade dos provetes ao oxigénio, foi medida com um medidor de bolha de sabão (Figura 3.20 g)). Para se proceder à medição da permeabilidade ao oxigénio da argamassa foram utilizadas as seguintes pressões 1,5, 2,5 e 3,5 bar recorrendo ao uso de oxigénio. Após a colocação inicial do provete na câmara de permeabilidade ao oxigénio, ajustou-se a pressão para 1,5 bar e fez-se um compasso de espera de 25 a 30 minutos para estabilizar a passagem de oxigénio pelo provete. Segundo a norma a bolha de sabão tem de demorar no mínimo 20 segundos a percorrer o tubo, caso contrário, muda-se a passagem de oxigénio do tubo e, põe-se o oxigénio a passar no tubo seguinte que apresenta sempre um diâmetro superior.

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão



Figura 3.20 – Ensaio de permeabilidade ao oxigénio das argamassas da série *Durabilidade*. a) Colocação da fita adesiva em redor do provete. b) Colocação da película plástica a envolver o provete. c) Provete envolvido em película plástica. d) Colocação dos provetes envolvidos em película plástica no interior do recipiente. e) Recipientes com os provetes na estufa. f) Câmara de permeabilidade ao Oxigénio. g) Equipamento utilizado na medição da permeabilidade – Medidor de bolha de sabão.

Após cada medição, a uma determinada pressão (que pode variar) entre 1,5, 2,5 e 3,5 bar, é feita uma pausa de 5 minutos. Decorrido este tempo, torna-se a fazer uma nova medição. Se a variação de tempo de subida da bolha no tubo for inferior ou igual a 3% da primeira leitura, então trata-se de uma leitura válida. Estes procedimentos repetem-se em todas as leituras posteriores referentes às restantes pressões.

Na determinação do valor de permeabilidade ao oxigénio (K_{oxig}), recorre-se à equação de Hagen-Poiseuille para escoamentos laminares e uniformes de fluidos compressíveis através de um corpo poroso e com capilares de pequena dimensão. Sabendo que a viscosidade dinâmica do oxigénio à temperatura de 20 °C é $2,02 \times 10^{-5}$ Ns/m² e utilizando provetes com um diâmetro de 150 mm e com espessura de 50 mm a equação de Hagen-Poiseuille assume a expressão da equação 3.10.

$$K_{\text{oxig}} = \frac{1,14 \times 10^{-5} \times Q p_a}{(p^2 - p_a^2)} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

onde:

K_{oxig} – Permeabilidade ao oxigénio (m²);

Q – Fluxo do fluido (m³/s);

P_a – Pressão absoluta do fluido à saída do provete, considerada neste ensaio igual à pressão atmosférica (N/m²);

P – Pressão absoluta do fluido à entrada do provete (N/m²).

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1 Considerações iniciais

Os resultados obtidos nos ensaios realizados na campanha experimental, (cujos procedimentos de ensaios foram descritos nas secções 3.4 e 3.5) são apresentados e analisados neste capítulo. A apresentação destes resultados é feita recorrendo a gráficos e quadros elaborados coerentemente quer em relação ao seu conteúdo quer no que diz respeito à sua forma. As características avaliadas em cada ensaio, têm a apresentação dos resultados obtidos para as diferentes composições estudadas, apresentadas num gráfico que permite uma visualização imediata do comportamento de todas as misturas referentes à característica em estudo.

4.2 Ensaios no estado fresco

Neste capítulo apresenta-se a exposição e análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados quando as argamassas preparadas ainda se encontravam no estado fresco, os procedimentos experimentais adotados nestes ensaios estão descritos no capítulo 3.4. Em relação aos resultados de cada um dos ensaios realizados começaram por se analisar separadamente os resultados dos ensaios obtidos com cada uma das séries de argamassas preparadas – *RAS* e *Durabilidade* - e posteriormente, analisaram-se criticamente os resultados à luz do estado actual do conhecimento. Embora, tanto para a série de argamassas *RAS* (secção 3.3.1.1) como para a série de argamassas *Durabilidade* (secção 3.3.2.1) sejam executados os mesmos ensaios, de acordo com mesmas normas, a comparação entre os resultados é difícil, pois a composição das argamassas pertencentes a cada uma das séries é diferente.

4.2.1 Consistência por espalhamento

Este ensaio é realizado com as argamassas no estado fresco, ou seja, antes destas ganharem presa permitindo avaliar a sua fluidez, sendo assim uma forma de avaliar a trabalhabilidade das argamassas. Este ensaio tem como objetivo estudar o efeito da incorporação de catalisador exausto de FCC nas argamassas estudadas, sendo a quantidade de superplastificante sempre a mesma (secção 3.4.1).

4.2.1.1 Consistência por espalhamento da série de argamassas RAS

Na Figura 4.1, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de consistência por espalhamento (descrito na secção 3.4.1) referente aos ensaios da série RAS, onde a argamassa após ser retirado o molde tronco-cónico é submetida a 15 pancadas em 15 segundos (de acordo com a norma ASTM C1437-07 [117]).

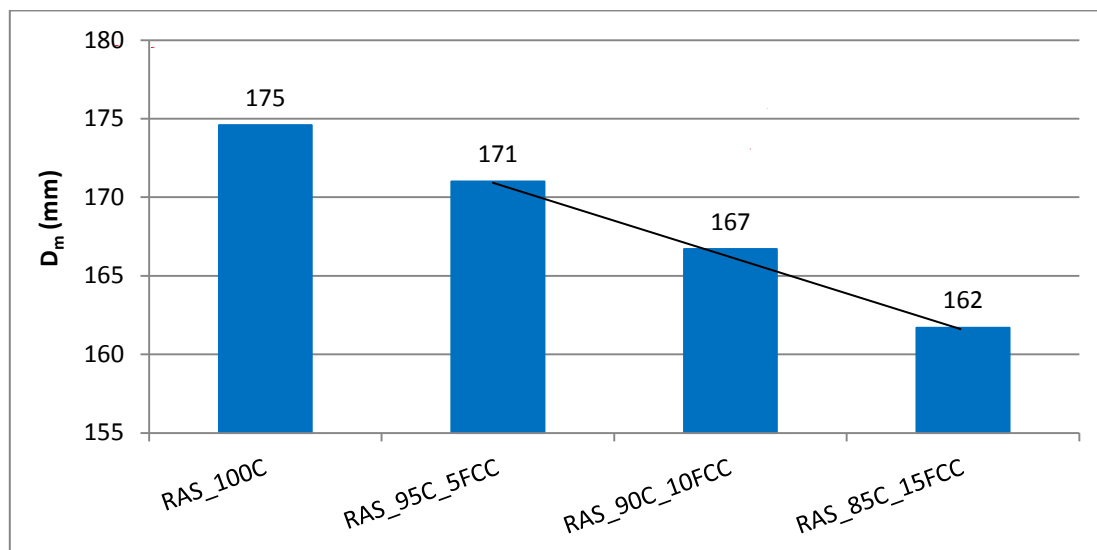


Figura 4.1 - Consistência por espalhamento (D_m) de acordo com a ASTM C1437-07 [117] (subsecção 3.4.1.1) da série de argamassas RAS. A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a consistência obtida por espalhamento em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.

A Figura 4.1 constitui uma reprodução da Figura 4.3 com uma alteração na escala das ordenadas para facilitar a comparação com os resultados que se apresentam na Figura 4.2.

Quando comparada a argamassa de referência (RAS_100C) (Figura 4.1) com as argamassas correspondentes às diferentes incorporações de catalisador exausto de FCC, constata-se que a argamassa de referência apresenta maior espalhamento e consequentemente maior trabalhabilidade. Analisando-se as argamassas com diferentes incorporações de catalisador exausto de FCC (RAS_95C_5FCC, RAS_90C_10FCC, RAS_85C_15FCC) e de acordo com a Figura 4.1 (método descrito na secção 3.4.1.1) o aumento da quantidade de catalisador exausto de FCC incorporado na argamassa, conduz a uma diminuição linear da trabalhabilidade como se evidencia na equação 4.1, obtida através do traçado da reta de regressão linear – $R^2=0,99$, para as diferentes composições de argamassas.

$$D_m = -0,93 \times (\% \text{ catalisador FCC incorporado}) + 175,77 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Na Figura 4.2 que se segue, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de consistência por espalhamento descrito na secção 3.4.1.2 referentes aos ensaios da série de argamassas *RAS*, onde a argamassa após ser retirado o molde tronco-cone é submetida a 25 pancadas em 15 segundos (de acordo com a norma ASTM C230-90 [120]).

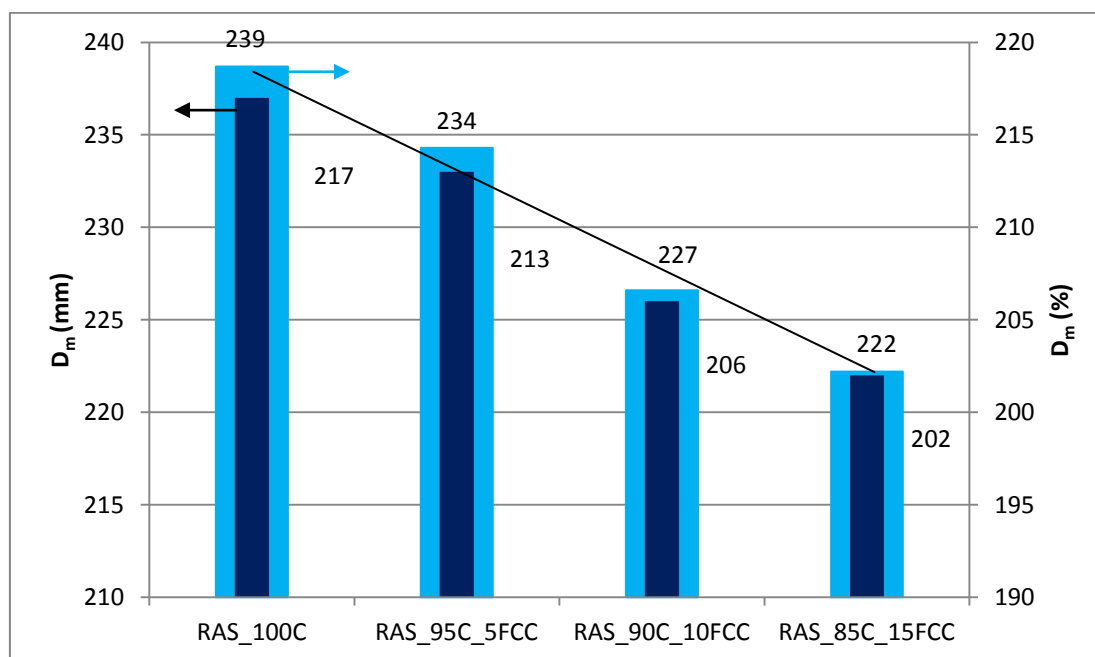


Figura 4.2 - Consistência por espalhamento (D_m) de acordo com a ASTM C230-90 [118] (subsecção 3.4.1.2) da série de argamassa *RAS*. A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a consistência obtida por espalhamento em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.

Na análise dos resultados obtidos verificou-se que a argamassa de referência (RAS_100C) apresenta valores de espalhamento superiores em relação às argamassas com diferentes teores de incorporação de catalisador exausto de FCC. Consta-se que o aumento da quantidade de catalisador exausto de FCC incorporado nas argamassas (RAS_95C_5FCC, RAS_90C_10FCC, RAS_85C_15FCC), conduz a uma diminuição linear da trabalhabilidade como se evidencia na equação 4.2, obtida através do traçado da reta de regressão linear – $R^2=0,98$, para as diferentes composições de argamassas.

$$D_m = -1,1 \times (\% \text{ catalisador FCC incorporado}) + 218 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Analisando comparativamente a Figura 4.1 e Figura 4.2 verifica-se que os espalhamentos obtidos foram diferentes, o que se atribuiu ao facto do processo de compactação das argamassas referente à Figura 4.2 ser mais energético (secção 3.4.1.2) quando comparado com os resultados obtidos na Figura 4.1, do qual o processo de compactação das argamassas difere (secção 3.4.1.1).

4.2.1.2 Consistência por espalhamento da série de argamassas *Durabilidade*

Na Figura 4.3 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de consistência por espalhamento descrito na secção 3.4.1.1 referente à série de argamassas *Durabilidade*, onde a argamassa após ser retirado o molde tronco-cone é submetida a 15 pancadas em 15 segundos (de acordo com a norma ASTM C1437-07 [117]).

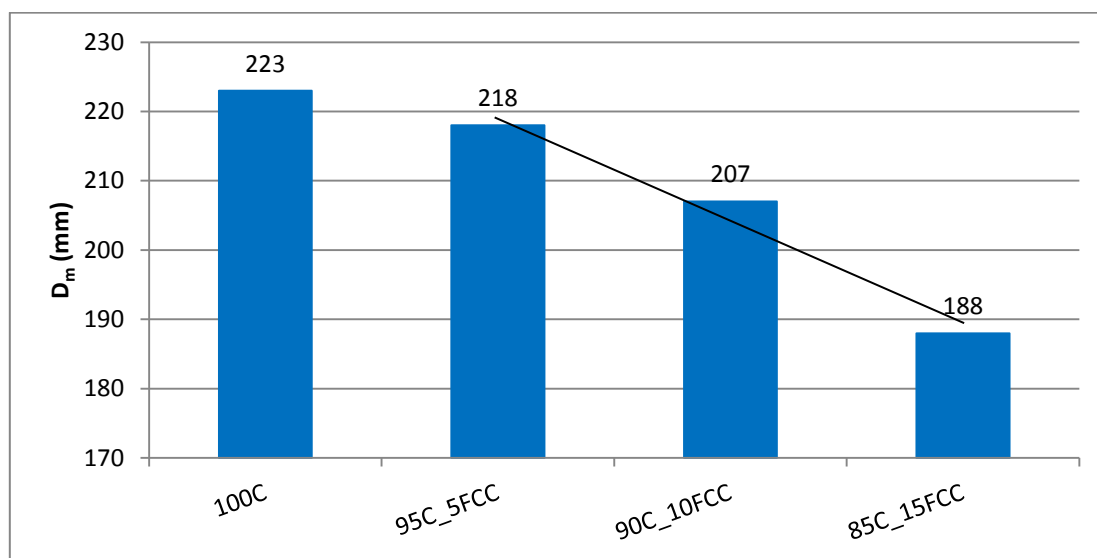


Figura 4.3 - Consistência por espalhamento (D_m) de acordo com a ASTM 1437-07 [117] (subsecção 3.4.1.1) da série de argamassas *Durabilidade*. A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a consistência obtida por espalhamento em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.

Na análise da Figura 4.3 verifica-se que a argamassa de referência (100C) apresenta uma maior trabalhabilidade quando comparada com as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC. Verifica-se que a incorporação do catalisador exausto de FCC como substituto parcial do cimento (95C_5FCC, 90C_10FCC, 85C_15FCC) conduz a uma perda linear de trabalhabilidade que é tanto maior quanto maior for a quantidade de catalisador exausto de FCC incorporado. Esta diminuição linear da trabalhabilidade é evidenciada na equação 4.3, obtida através do traçado da reta de regressão linear – $R^2=0,98$, para as diferentes composições de argamassas.

$$\text{Espalhamento} = -3 \times (\% \text{ catalisador FCC incorporado}) + 234,33 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

A realização do ensaio de consistência por espalhamento nas argamassas da série *Durabilidade*, de acordo com a ASTM C230-90 [118] (descrito na secção 3.4.1.2), onde a argamassa após ser retirado o molde tronco-cone é submetida a 25 pancadas em 15 segundos, conduziu a um espalhamento superior ao diâmetro da mesa de espalhamento, não permitindo a sua medição.

A diminuição da trabalhabilidade com o aumento do teor de resíduo incorporado pode ser atribuído sobretudo ao facto de o catalisador exausto de FCC ser um aluminossilicato que apresenta uma elevada área de superfície (Tabela 3.2) necessitando por isso, maior quantidade de água [106, 108, 109, 110].

4.2.2 Massa volúmica

Tal como no ensaio da consistência por espalhamento (secção 4.2.1), o ensaio para a determinação da massa volúmica também foi efetuado para a série *RAS* e para a série *Durabilidade*.

4.2.2.1 Massa volúmica da série de argamassas *RAS*

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios da massa volúmica (descrito na secção 3.4.2) referente aos ensaios da série de argamassas *RAS*.

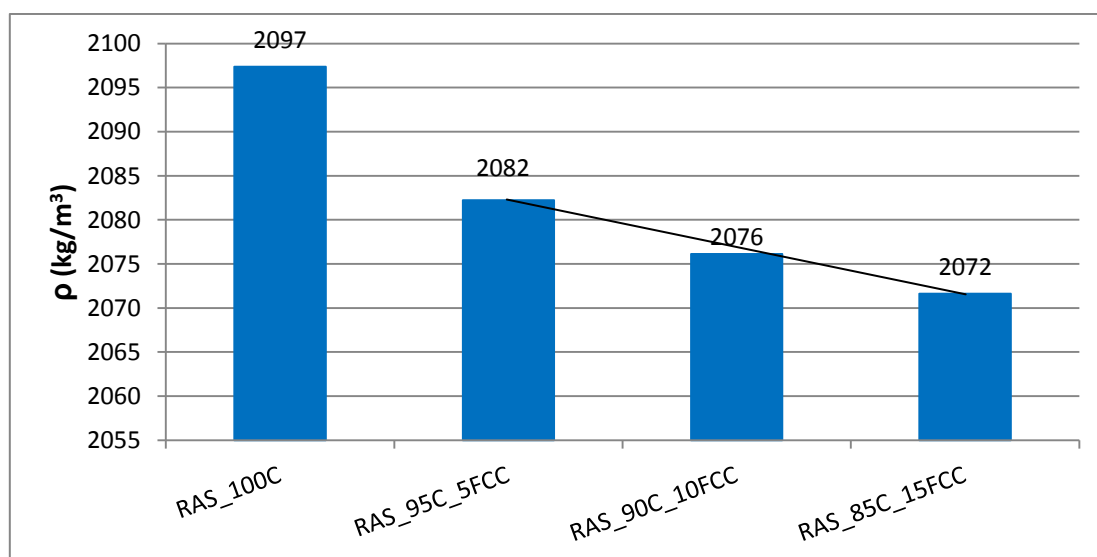


Figura 4.4 - Massa volúmica (ρ) da série de argamassas *RAS*. A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a massa volúmica em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.

De acordo com análise da Figura 4.4, constata-se que a argamassa de referência apresenta uma massa volúmica superior em comparação às argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC. Ao comparar as argamassas com diferentes teores de incorporação de catalisador exausto de FCC, verifica-se que à medida que se aumenta a quantidade de catalisador exausto de FCC o valor da massa volúmica diminui. Esta diminuição linear da massa volúmica é evidenciada na equação 4.4, obtida através do traçado da reta de regressão linear – $R^2=0,99$, para as diferentes composições de argamassas.

$$\rho = -1,062 \times (\% \text{ catalisador FCC incorporado}) + 2087,3 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

4.2.2.2 Massa volúmica série de argamassas *Durabilidade*

Na Figura 4.5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios da massa volúmica, descrito na (secção 3.4.2) referente aos ensaios da série de argamassas *Durabilidade*.

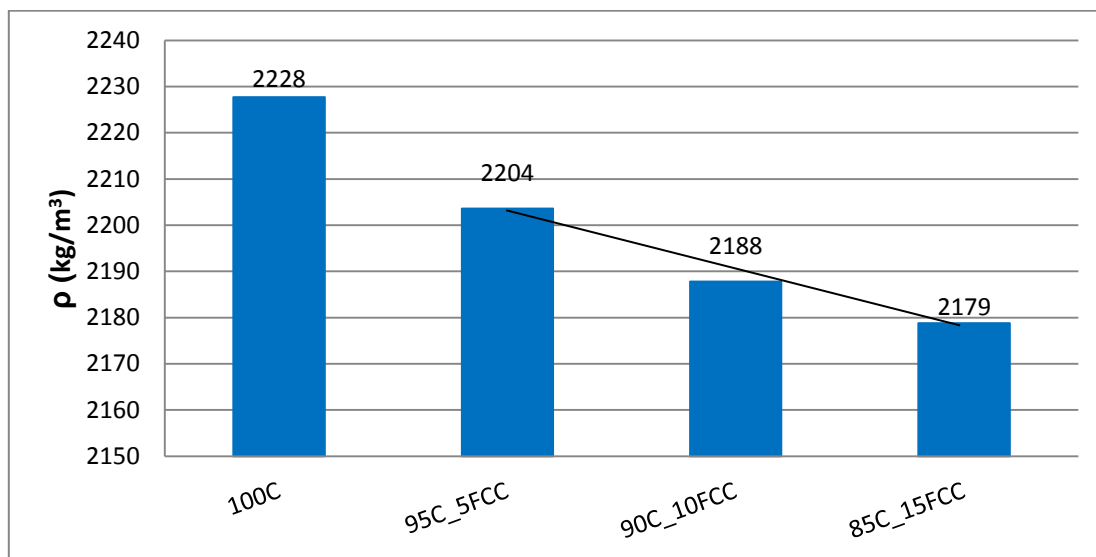


Figura 4.5 - Massa volúmica (ρ) da série de argamassas *Durabilidade*. A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a massa volúmica em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.

Ao analisar a Figura 4.5 verifica-se que a argamassa de referência (100C) apresenta maior massa volúmica quando comparada com as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC. Nas argamassas com diferentes teores de catalisador exausto verifica-se que à medida que se aumenta a quantidade de catalisador exausto de FCC o valor da massa volúmica diminui. Esta diminuição linear da massa volúmica é evidenciada na equação 4.5, obtida através do traçado da reta de regressão linear – $R^2=0,98$, para as diferentes composições de argamassas.

$$\rho = -2,477 \times (\% \text{ catalisador FCC incorporado}) + 2214,9 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Nos ensaios de determinação da massa volúmica quer das argamassas da série *RAS* quer das argamassas da série *Durabilidade*, observou-se um comportamento semelhante ao obtido em estudos anteriores realizados com catalisador exausto de FCC [109, 110].

4.2.3 Teor de ar

No ensaio de determinação do teor de ar pretende-se saber o volume de ar existente nas argamassas frescas.

4.2.3.1 Teor de ar da série RAS

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de determinação do teor de ar (descrito na secção 3.4.3) referente aos ensaios da série RAS.

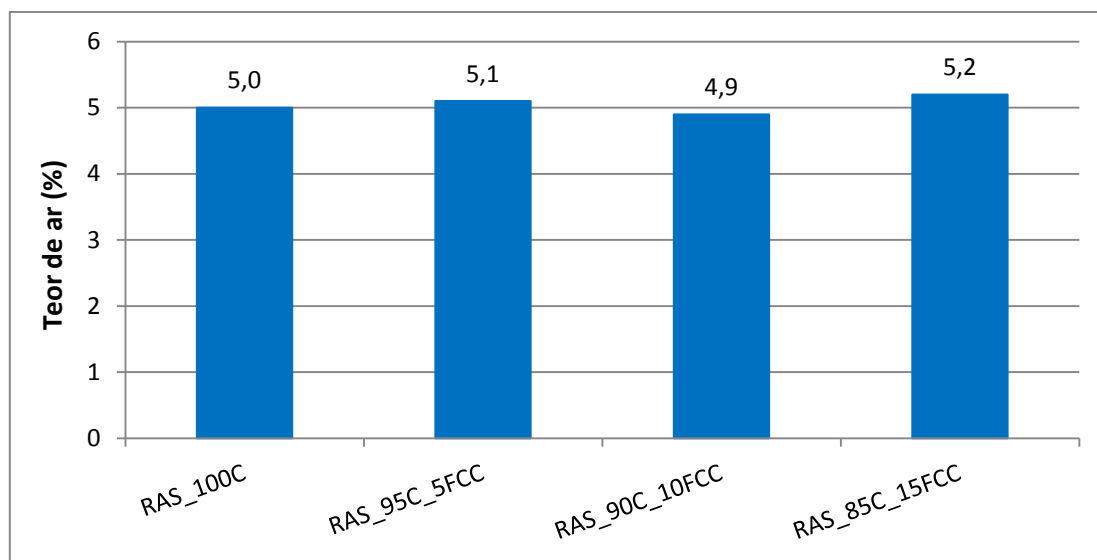


Figura 4.6 - Teor de ar da série de argamassas RAS.

Na análise dos dados apresentados na Figura 4.6 observa-se que quando comparando a argamassa de referência (RAS_100C) com as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC (RAS_95C_5FCC, RAS_90C_10FCC e RAS_85C_15FCC), ou mesmo quando se comparam as argamassas com diferentes teores de incorporação de catalisador exausto de FCC, verifica-se uma pequena diferença nos valores de teor de ar, que se considera não ser significativa.

4.2.3.2 Teor de ar da série de argamassas Durabilidade

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios do teor de ar descrito na (secção 3.4.3) referente aos ensaios da série de argamassas de Durabilidade.

Na análise dos dados apresentados na Figura 4.7 observa-se que quando comparando a argamassa de referência (100C) com as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC (95C_5FCC, 90C_10FCC e 85C_15FCC), ou mesmo quando se comparam as argamassas com diferentes teores de incorporação de

catalisador exausto de FCC, verifica-se uma pequena diferença nos valores de teor de ar, que se considera não ser significativa.

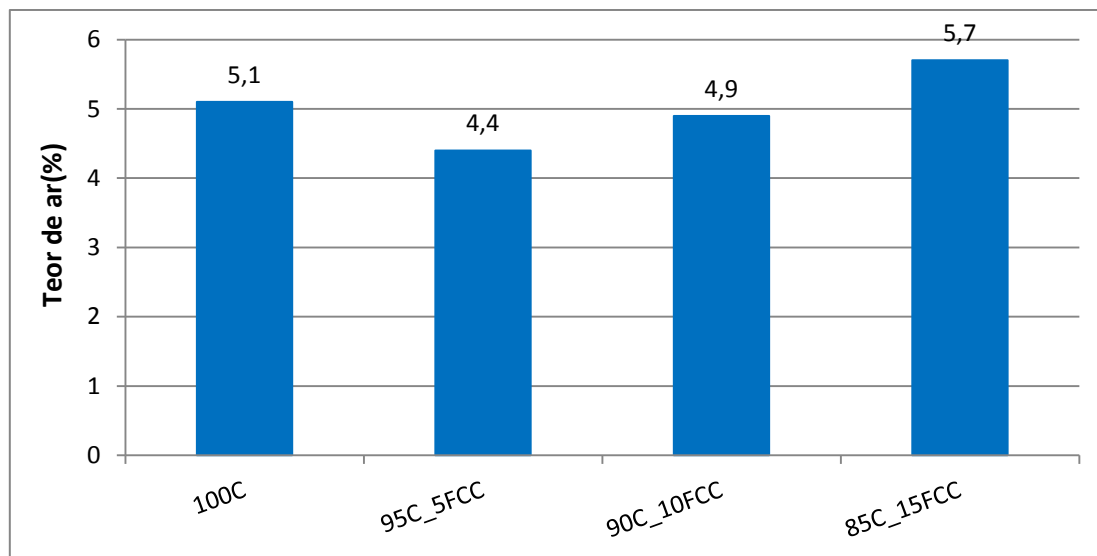


Figura 4.7 - Teor de ar da série de argamassas *Durabilidade*.

4.3 Análise de resultados dos ensaios no estado endurecido

No que diz respeito às argamassas preparadas faz-se neste capítulo a exposição e análise dos resultados obtidos nos ensaios: reação álcalis-sílica, resistência mecânica, absorção capilar, resistência à carbonatação acelerada, difusão de cloretos em regime não estacionário, módulo de elasticidade à compressão e permeabilidade ao oxigénio. As metodologias dos ensaios de caracterização no estado endurecido são descritas na secção 3.5.

4.3.1 Ensaio da série de argamassas *RAS* - ensaio de reação álcalis-sílica acelerada

A reação álcalis-sílica corresponde às reações químicas que ocorrem entre a sílica reativa que constitui o agregado (no caso de argamassas, a areia) e os iões álcalis, particularmente Na^+ e K^+ presentes na solução intersticial das argamassas [32, 99]. A reação produz na argamassa, em torno dos agregados, um gel de silicatos alcalinos, pouco denso, que induz expansão.

Na Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios da reação alcalis-sílica descrito na (secção 3.5.1) referente aos ensaios da série de argamassas RAS.

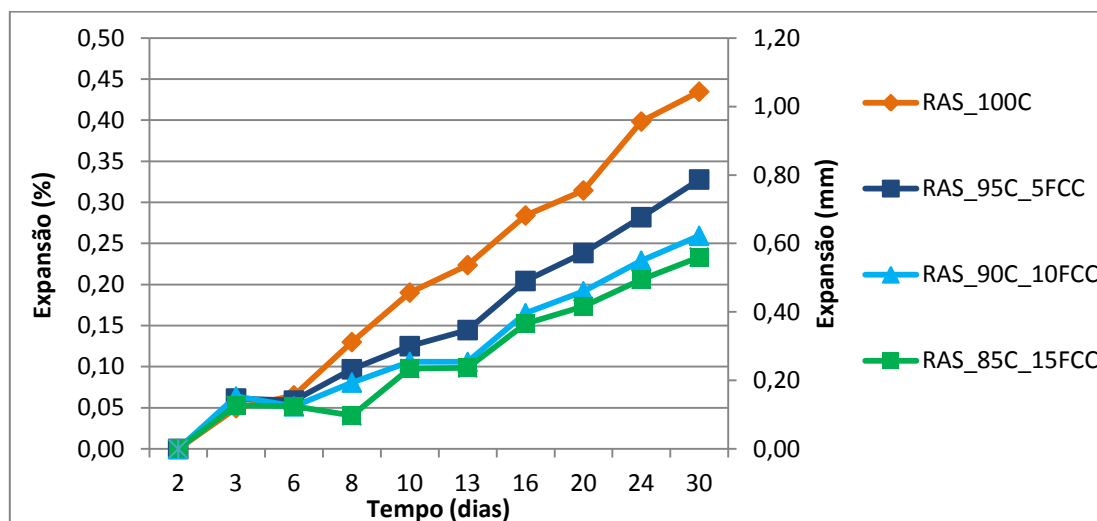


Figura 4.8 – Expansão dos provetes, em solução de 1N de NaOH da série de argamassas RAS.

Analisando a Figura 4.8 observa-se na argamassa de referência (RAS_100C) sempre um aumento do comprimento dos provetes no decorrer de todo o tempo do ensaio. Este aumento de comprimento é sempre superior quando comparado com os valores obtidos nas argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC. Nas misturas com catalisador exausto de FCC observam-se expansões dos provetes e verifica-se que quanto maior for o teor de catalisador exausto de FCC incorporado, menor é a expansão dos provetes em consequência da reação álcalis-sílica.

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados obtidos referentes ao aumento de massa dos provetes. Observa-se que tanto a argamassa de referência (RAS_100C) como as argamassas com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC apresentam um aumento de massa. As argamassas com 5% e 10% de catalisador exausto de FCC (RAS_95C_5FCC e RAS_90C_10FCC) registam um aumento relativo de massa superior à argamassa de referência (RAS_100C) aos 6 dias e depois aos 22 dias mantendo-se este aumento até ao final do período experimental (30 dias). No entanto, e de um modo geral, a argamassa com 15% de catalisador exausto de FCC (RAS_85C_15FCC) regista um menor ganho de massa relativamente a todas as outras argamassas (RAS_100C, RAS_95C_5FCC e RAS_90C_10FCC).

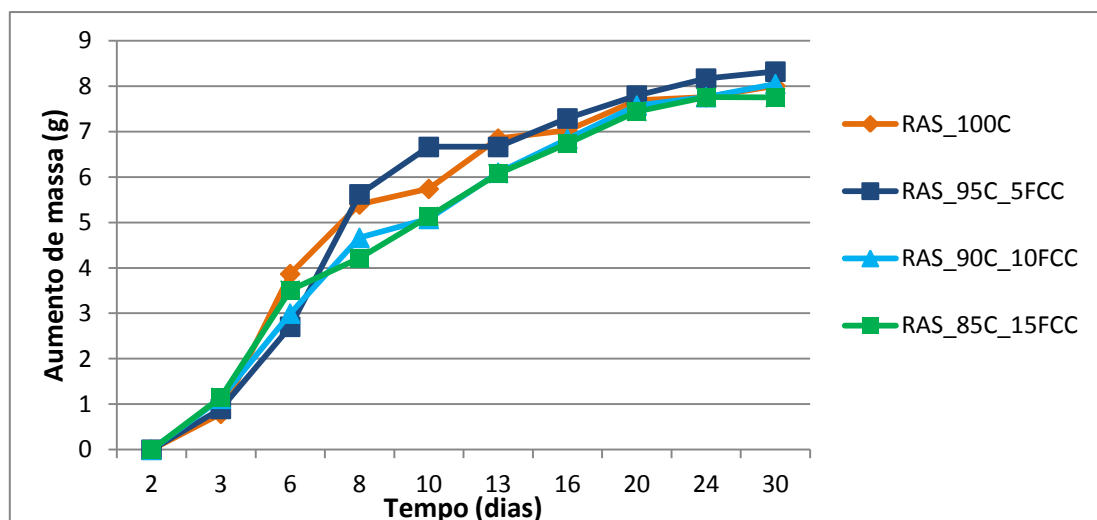


Figura 4.9 - Aumento de massa dos provetes da série de argamassas RAS.

Na Figura 4.10 são analisados e comparados os valores obtidos na expansão com o aumento de massa, ao fim de 30 dias de estudo da reação álcalis-sílica. Na análise aos resultados confirma-se que a argamassa de referência (RAS_100C) apresenta um maior valor de expansão comparativamente às argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC, o que não se verifica em relação ao aumento de massa que é inferior comparativamente aos aumentos de massa argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC (RAS_95C_5FF e RAS_90C_10FCC), à exceção da argamassa com 15% de catalisador exausto de FCC (RAS_85C_15FCC). Nas argamassas com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC, verifica-se uma diminuição da expansão que é inversamente proporcional à quantidade de incorporação de catalisador exausto de FCC.

Dada a ausência de literatura científica, do efeito da incorporação de catalisador exausto de FCC nas reações alcalis-silica, analisou-se criticamente os resultados obtidos à luz de estudos existentes com o zeólito natural. A adição de zeólito natural no betão pode inibir a expansão da RAS, visto que os iões alcalinos (K^+ e Na^+) que existem na solução intersticial dos poros do betão são absorvidos na estrutura do zeólito, diminuindo o teor de iões alcalinos disponíveis para participarem nas reações álcalis-sílica, inibindo assim eficazmente a RAS [18, 69, 76, 128].

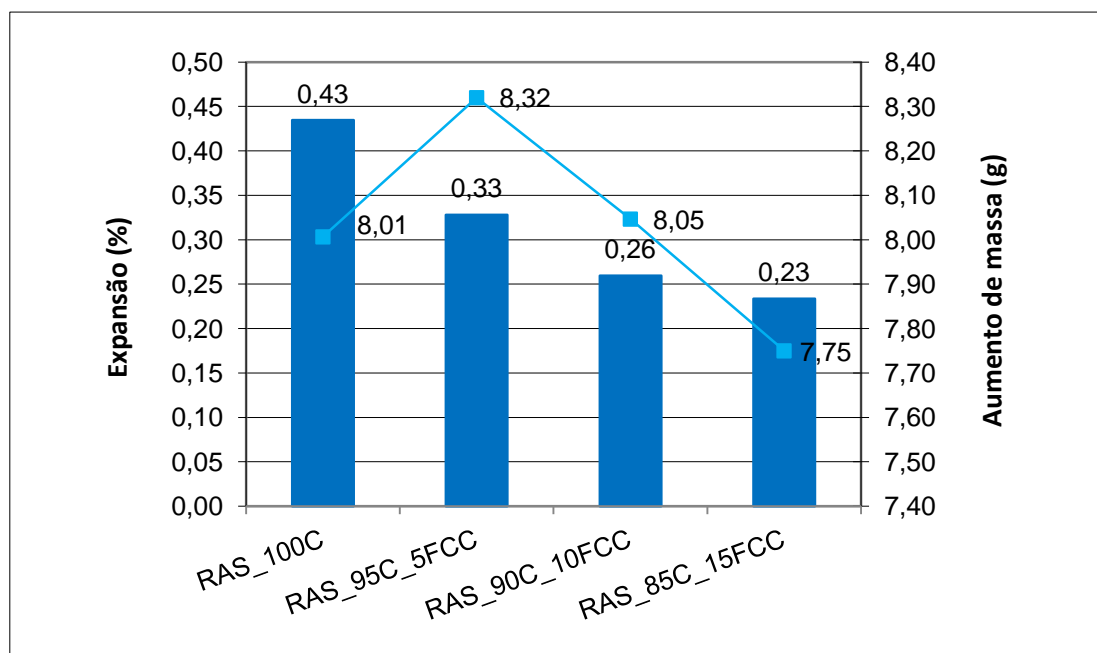


Figura 4.10 – Comparação entre a expansão e o aumento de massa dos provetes aos 30 dias, da série de argamassas RAS.

4.3.2 Ensaios da série de argamassas *Durabilidade*

O estudo desta série de argamassas é constituído por ensaios no estado endurecido e encontram-se descritos na Tabela 3.1.

4.3.2.1 Ensaio de resistência mecânica à flexão e à compressão

Nos ensaios de resistência à flexão e à compressão é estudada a capacidade que as argamassas apresentam para suportar os esforços mecânicos que actuam sobre as mesmas. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica correspondem a diferentes idades.

Na Figura 4.11, são apresentados os resultados obtidos no ensaio da resistência à flexão (descrito na secção 3.5.2.1), da série de argamassas *Durabilidade*. Ao analisar os resultados obtidos verifica-se que existe uma tendência para o aumento da tensão de rotura à flexão com o aumento do tempo de hidratação das argamassas, ou seja, com a idade da argamassa como seria de esperar. Mas comparativamente à argamassa de referência (100C) constata-se que, com a substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC, o valor da resistência à flexão é sempre inferior, à excepção da argamassa constituída por 5% de catalisador exausto de FCC (95C_5FCC) que apenas ao sétimo dia atingiu um valor superior.

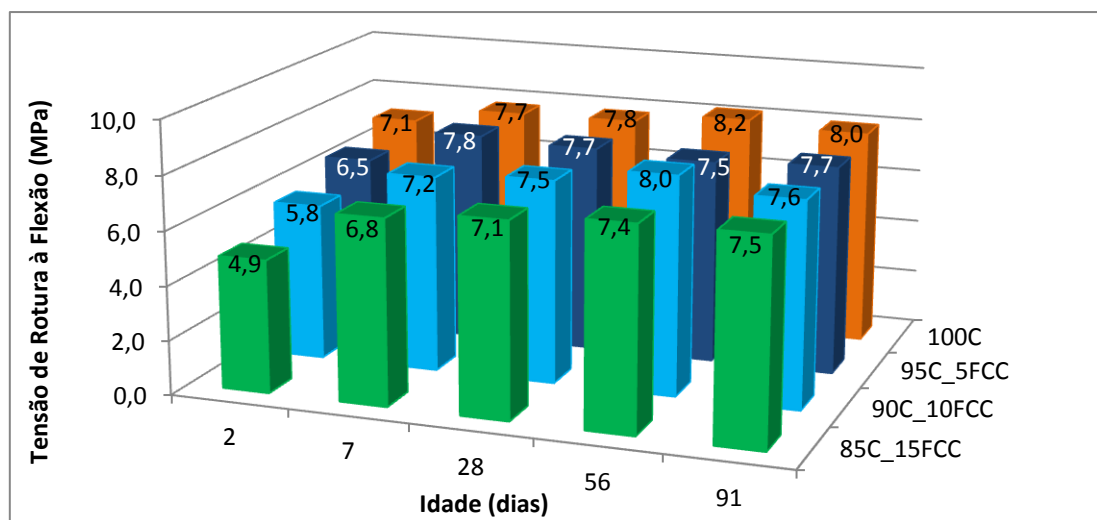


Figura 4.11- Resistência mecânica à flexão, da série de argamassas *Durabilidade*.

Nos ensaios de resistência mecânica à flexão das argamassas da série Durabilidade, verificou-se um comportamento idêntico embora os resultados sejam inferiores aos obtidos em estudos anteriores realizados com catalisador exausto de FCC [109, 110].

A atividade pozolânica das argamassas é determinada através do índice de atividade (IA), este é definido como sendo a relação entre a resistência da argamassa com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC, com uma determinada idade e a resistência da argamassa de referência (100C), com a mesma idade e sujeita às mesmas condições.

Na análise crítica e discussão dos resultados relativamente ao estudo das propriedades mecânicas das argamassas com incorporação de resíduos, recorreu-se ao cálculo do índice de atividade pozolânica com base no proposto pela norma ASTM C311-07 [129], cuja expressão de cálculo (Eq. 4.6) é:

$$\text{Índice de Atividade (IA)} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.6})$$

onde:

A – Valor médio da resistência mecânica (à flexão ou à compressão) da argamassa produzida com uma dada mistura;

B – Valor médio da resistência mecânica (à flexão ou à compressão) da argamassa de referência com a mesma idade.

Embora a norma só proponha esta avaliação aos 28 dias, no presente trabalho determinou-se o índice de atividade para avaliação da atividade pozolânica para as várias idades de hidratação em função do teor de substituição.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica à flexão correspondem a diferentes idades (tempos de hidratação).

No Tabela 4.1 encontram-se registados os valores do Índice de atividade, com base na resistência à flexão, das argamassas com diferentes teores de substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC.

Tabela 4.1- Índice de atividade, com base na resistência mecânica à flexão, da série de argamassas *Durabilidade*

Idades (dias)	Índice de Atividade – Flexão (%)				
	2	7	28	56	91
95C_5FCC	91,2	100,7	98,5	91,9	96,4
90C_10FCC	80,9	93,4	96,3	98,6	94,9
85C_15FCC	68,5	88,1	91,9	91,0	93,7

Entende-se por atividade pozolânica a capacidade que uma determinada pozolana tem em reagir com o hidróxido de cálcio, ou seja, quanto maior o valor de hidróxido de cálcio consumido na reação pozolânica, maior é o seu índice de atividade. Quando estas têm na sua constituição uma substituição parcial de cimento por um outro material não reativo dá-se o efeito de diluição, que se traduz tipicamente numa diminuição da resistência mecânica das argamassas proporcional à quantidade de substituição parcial de cimento. Tem atividade pozolânica se a resistência é superior ao que apresentaria se se determinasse a resistência tendo a consideração o efeito de diluição da argamassa pela substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC. No presente ensaio a resistência mecânica à flexão das argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC é inferior quando equiparada à argamassa de referência (100C). Confirma-se que o catalisador exausto de FCC apresenta atividade pozolânica, nas composições com 5% e 10% de catalisador exausto de FCC aos 7 dias e na composição com 15% com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC aos 28 dias, pois os diferentes IA apresentam valores superiores à percentagem de cimento presente na argamassa.

Na Figura 4.12, são apresentados os resultados obtidos no ensaio da resistência á compressão (descrito na secção 3.5.2.1) da série de argamassas *Durabilidade*. Observa-se que nas argamassas com 10% e 15% de percentagem de substituição parcial do cimento por catalisador exausto de FCC, ocorre um desenvolvimento mais lento em termos de resistência à compressão como se pode constatar nos valores obtidos aos 2 e 7 dias de idade, ou seja, nestas idades a argamassa de referência (100C) apresenta uma resistência superior comparativamente às argamassas com

10% e 15% de incorporação catalisador exausto de FCC (90C_10FCC e 85C_15FCC). A partir dos 28 dias de idade, comparativamente à argamassa de referência, verifica-se que todas as argamassas incorporadas com catalisador exausto de FCC apresentam uma resistência à compressão semelhante ou superior.

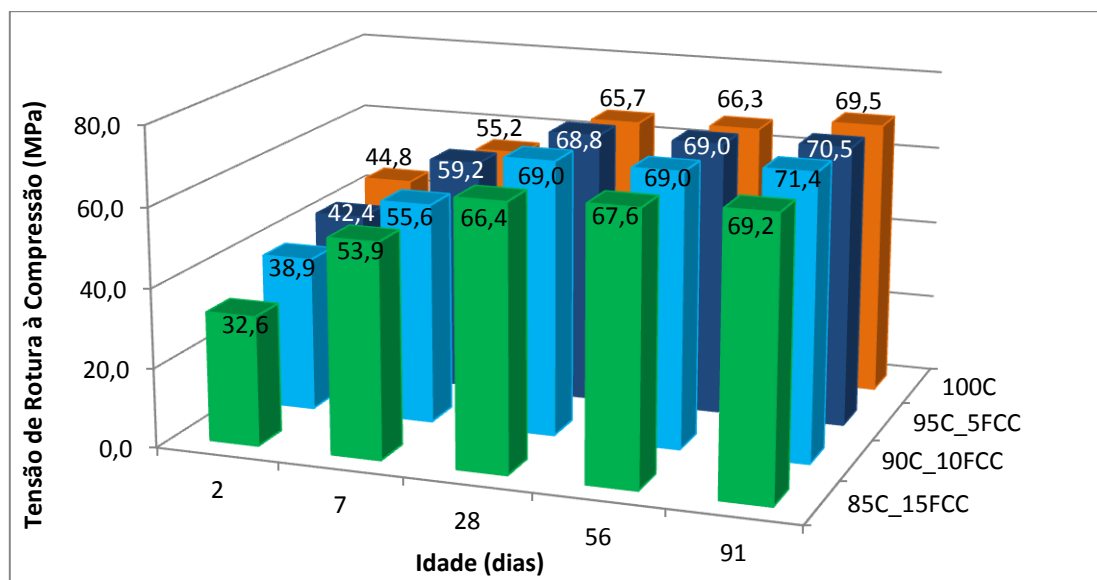


Figura 4.12- Resistência mecânica à compressão, da série de argamassas *Durabilidade*.

Com o aumento da incorporação de catalisador exausto de FCC a resistência à compressão aumenta à excepção da argamassa com 15% de incorporação catalisador exausto de FCC (85C_15FCC), o que pode ser atribuído ao efeito de diluição, que consiste na diminuição da concentração de cimento originada pela incorporação de um substituto cimentício (pozolana) que, tem como consequência, a diminuição do hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento, contribuindo para a diminuição do calor de hidratação e da reação pozolânica [130].

Nos ensaios de resistência mecânica à compressão das argamassas da série *Durabilidade*, verificou-se um comportamento semelhante embora os resultados sejam superiores aos obtidos em estudos anteriores realizados com catalisador exausto de FCC [109, 110].

Na Tabela 4.2 estão registados os valores do Índice de atividade, com base na resistência à compressão, das argamassas com diferentes teores de substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC.

Tabela 4.2- Índice de atividade, com base na resistência mecânica à compressão, da série *Durabilidade*

Índice de Atividade – Compressão (%)					
Idades (dias)	2	7	28	56	91
95C_5FCC	94,6	107,2	104,7	104,0	101,4
90C_10FCC	86,8	100,6	105,1	104,1	102,7
85C_15FCC	72,7	97,7	101,0	101,9	99,6

Confirma-se que para os valores apresentados na Tabela 4.2, o catalisador exausto de FCC apresenta atividade pozolânica, nas composições com 5%, 10% e 15% de catalisador exausto de FCC aos 7 dias, pois os diferentes IA apresentam valores superiores à percentagem de cimento presente na argamassa.

Ao comparar os valores da resistência mecânica da argamassa de referência (100C), com os valores da resistência mecânica das argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC, verifica-se que a partir dos 28 dias nas argamassas com catalisador exausto de FCC os valores de resistência da argamassa de referência (100C) são inferiores ao das argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC à exceção da argamassa com 15% de teor de catalisador exausto de FCC. Estes resultados são concordantes com os obtidos por outros autores [109, 110] que utilizaram o resíduo catalisador exausto de FCC fornecido pela refinaria de Sines e por autores que utilizaram o catalisador exausto de FCC proveniente de outra refinaria [106].

A partir dos 7 dias todas as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC apresentam uma resistência à compressão superior à argamassa de referência, em valor absoluto a argamassa com 10% de incorporação de catalisador exausto de FCC é a que apresenta maiores valores [108].

O aumento da resistência à compressão pode ser atribuível ao aumento da densidade da matriz cimentícia originado pela reação pozolânica onde o hidróxido de cálcio é transformado em C-S-H que vai diminuir a dimensão dos poros [72].

De acordo com os resultados de resistência à compressão, quer para a argamassa de referência quer para as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC, verifica-se que os valores obtidos, apresentam uma resistência à compressão superior a 45 MPa aos 28 dias, cumprindo o requisito da norma NP EN 1504-03 [63]. Sendo assim esta argamassa corresponde ao requisito estrutural e não estrutural podendo vir a ser utilizada em qualquer uma classes (R4 e R3, R2 e R1).

4.3.2.2 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade à compressão

Neste ensaio obteve-se uma medida de rigidez para as argamassas em estudo que possibilitou a avaliação da deformabilidade das argamassas. A diminuição do módulo de elasticidade corresponde ao aumento da deformabilidade das argamassas.

Na Figura 4.13 são apresentados os resultados obtidos no ensaio da determinação do módulo de elasticidade à compressão (descrito na secção 3.5.2.2).

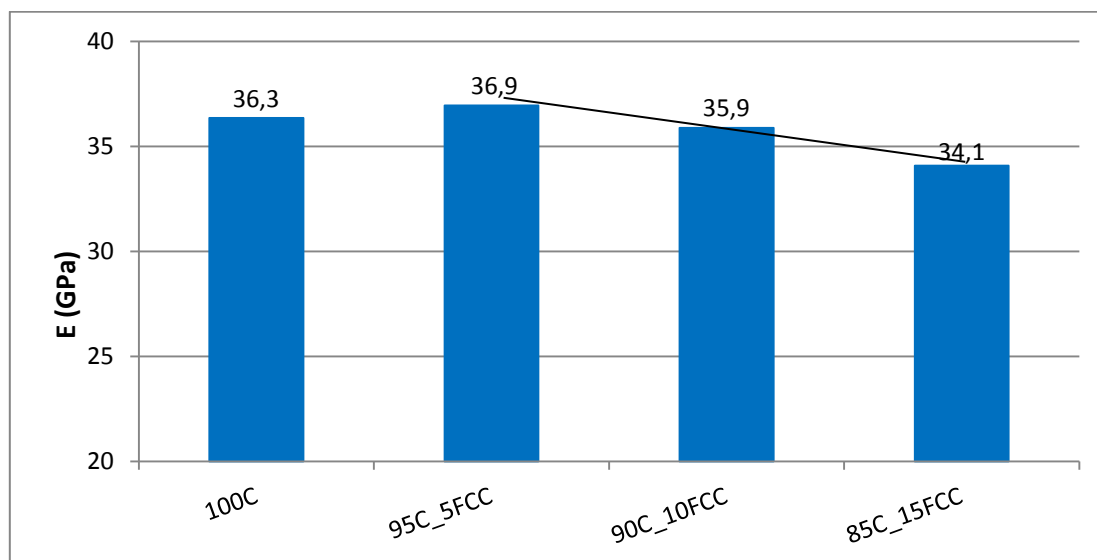


Figura 4.13- Módulo de elasticidade (E) à compressão aos 28 dias de idade das argamassas, da série de argamassas *Durabilidade*. A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre o módulo de elasticidade à compressão em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.

Na análise da Figura 4.13, referente aos valores obtidos para o módulo de elasticidade correspondente à idade de 28 dias, verifica-se que em relação à argamassa de referência (100C), só a argamassa com 5% de catalisador exausto de FCC (95C_5FCC) apresenta maior valor de módulo de elasticidade, as argamassas com 10% e 15% de catalisador exausto de FCC (90C_10FCC e 85C_15FCC), apresentam valores de módulo de elasticidade inferiores ao da argamassa de referência (100C). Nas argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC constata-se que com o aumento da incorporação deste, o valor do módulo de elasticidade diminui, verificando-se uma relação linear em que $R^2=0,98$ e expressa pela equação 4.8.

$$\text{Módulo de elasticidade} = -0,86 \times (\% \text{ catalisador FCC incorporado}) + 174,95 \quad (\text{Eq. 4.8})$$

De um modo geral, o módulo de elasticidade é tanto maior quanto maior for a resistência à compressão da argamassa ou betão, sendo a taxa de crescimento do módulo de elasticidade inferior à taxa de crescimento da resistência mecânica da argamassa ou betão [17]. Analisando os resultados obtidos aos 28 dias do módulo de

elasticidade na Figura 4.13 e da resistência à compressão na Figura 4.12, não se observa a lei normal de variação destas grandezas, pois apenas para a argamassa de referência (100C) e para a argamassa com incorporação de 5% de catalisador exausto de FCC quanto maior for a resistência compressão maior foi o módulo de elasticidade, nas argamassas com incorporação de 10% e 15% de catalisador exausto de FCC a resistência à compressão foi superior embora com um menor módulo de elasticidade.

De acordo com os resultados de módulo de elasticidade à compressão, quer para a argamassa de referência quer para as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC, verifica-se que os valores obtidos, apresentam um módulo de elasticidade superior a 20 GPa aos 28 dias, cumprindo o requisito da norma NP EN 1504-03 [63]. Sendo assim esta argamassa corresponde ao requisito estrutural e não estrutural podendo vir a ser utilizada em qualquer uma classes (R4, R3, R2 e R1).

4.3.2.3 Ensaio de absorção capilar

O ensaio de absorção capilar contribui para um melhor conhecimento das características de durabilidade inerentes a estas argamassas.

Na Figura 4.14 apresentam-se os valores dos coeficientes de absorção capilar obtidos ao longo do tempo nas argamassas da série *Durabilidade*. Estes valores foram calculados a partir da equação 3.10 recorrendo aos resultados obtidos no ensaio de absorção capilar descrito na secção 3.5.2.3.

De acordo com os resultados obtidos, apresentados na Figura 4.14, verifica-se que o coeficiente de absorção capilar da argamassa de referência (100C) é superior aos coeficientes de absorção de qualquer uma das outras argamassas estudadas com incorporação do resíduo. Nas argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC, verifica-se que quanto maior for a quantidade deste incorporada na argamassa menor é o coeficiente de absorção de água por capilaridade. Assim sendo, quanto menor for o coeficiente de absorção capilar maior será a resistência à absorção de água por capilaridade o que contribuirá para reduzir a reação alcális-agregado pois a água é um elemento fundamental dessa reação e, por outro lado, maior será a resistência à penetração de agentes agressivos nomeadamente os cloretos cuja penetração se realiza através do fenómeno da capilaridade entre outros [33, 106, 108]. A diminuição da absorção capilar observada com a incorporação do resíduo pode ser atribuída à diminuição da dimensão dos poros, consequência da reação pozolânica segundo a qual o hidróxido de cálcio é transformado em C-S-H, C-A-H e C-A-S-H, o

que contribui para tornar a argamassa mais densa e menos porosa, diminuindo a absorção através da rede capilar [72].

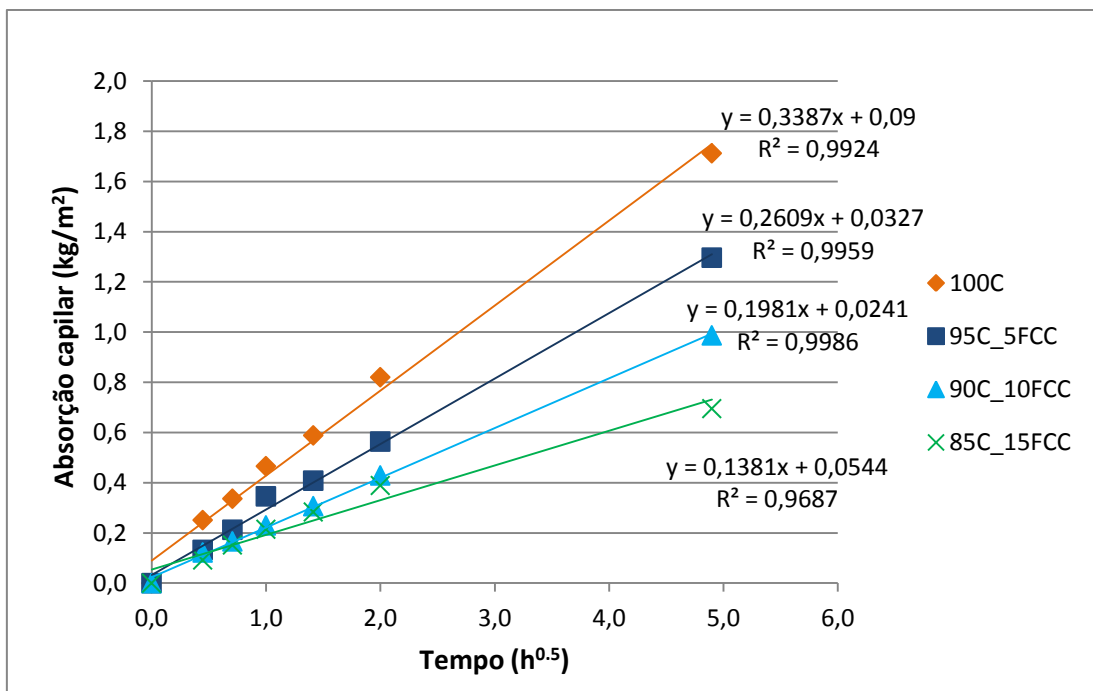


Figura 4.14- Coeficiente de absorção capilar, da série de argamassas *Durabilidade*. As retas de regressão linear e as respectivas expressões das equações representadas correspondem à correlação - R^2 - verificada entre a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo decorrido.

De acordo com análises de porometria por intrusão de mercúrio efetuadas, a incorporação de catalisador exausto de FCC reduz o diâmetro dos poros, principalmente para os poros de diâmetro inferior a 0,5 μm . As argamassas com incorporação de 15% de catalisador exausto de FCC apresentam uma redução importante da porosidade capilar, ou seja, dá-se um aumento de poros de gel que devido ao seu tamanho muito pequeno não contribuem para processos de difusão. Estes resultados são concordantes com os obtidos por outros autores que utilizaram o resíduo catalisador exausto de FCC fornecido proveniente de outra refinaria [30].

Verifica-se que os valores do coeficiente de absorção capilar obtidos, quer para a argamassa de referência quer para as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC, apresentam um coeficiente de absorção inferior a 0,5 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0.5})$, cumprindo mais um dos requisitos da norma NP EN 1504-03 [63]. Sendo assim estas argamassas podem vir a ser utilizadas em qualquer uma das classes (R4 e R3, R2 e R1).

4.3.2.4 Ensaio de difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH)

A penetração de cloretos influencia a durabilidade das estruturas de betão armado devido à destruição da película passiva do aço e conseqüente corrosão das armaduras. Neste ensaio, ao utilizar o catalisador exausto de FCC como substituto parcial do cimento, pretende-se avaliar a influência deste nas argamassas quando sujeitas à difusão de cloretos em regime não estacionário.

Na Figura 4.15 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH) (descrito na secção 3.5.2.4) ao longo do tempo nas argamassas da série *Durabilidade*.

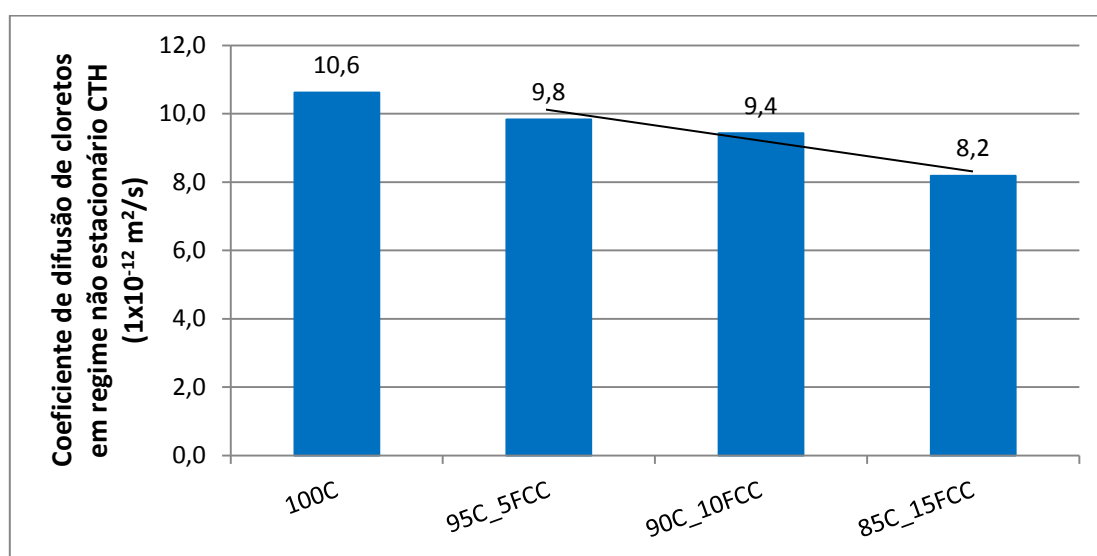


Figura 4.15- Coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH), da série de argamassas *Durabilidade*. A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre o coeficiente de difusão de cloretos em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.

A partir da análise dos dados obtidos e apresentados na Figura 4.15, verifica-se que o coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário da argamassa de referência (100C), é superior aos coeficientes de difusão de cloretos em regime não estacionário de qualquer uma das outras argamassas estudadas. Assim sendo, os resultados sugerem que a penetração de cloretos é dificultada pela adição do catalisador exausto de FCC traduzida numa ligeira redução do coeficiente de difusão. Adicionalmente verifica-se que quanto maior for a quantidade de catalisador exausto de FCC utilizado como substituto parcial de cimento, menor é o valor obtido para o

coeficiente de difusão de cloretos, verificando-se uma relação linear onde $R^2=0,98$ e expressa pela equação 4.7.

$$\text{Coef. de Difusão de Cloretos} = -0,1646 \times (\% \text{ catalisador FCC incorporado}) + 10,796 \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Considera-se que estes resultados se devem ao facto da difusão de cloretos em regime não estacionário ser afetada pela porosidade e pela capacidade de retenção de cloretos por parte da matriz cimentícia [33].

Ainda, com o aumento da quantidade de catalisador exausto de FCC incorporado, a diminuição do coeficiente de difusão de cloretos pode também ser atribuída à possível formação do sal de Friedel (Fs). Este é originado nas reações entre silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e os cloretos, reação esta que consome parte da reserva alcalina, originando uma redução da portlandite [30, 33].

Outra possível hipótese para justificar a diminuição do coeficiente de difusão de cloretos é a formação adicional de silicatos de cálcio hidratados, aluminatos de cálcio hidratados e aluminossilicatos de cálcio de hidratados (C-S-H, C-A-H e C-A-S-H) originados na reação pozolânica do catalisador exausto de FCC, que refinam os poros da matriz cimentícia aumentando assim a resistência à penetração de cloretos [31].

4.3.2.5 Ensaio de resistência à carbonatação acelerada

A carbonatação nos materiais à base de cimento é o resultado da reação química dos seus constituintes particularmente o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) com o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera formando o carbonato de cálcio (CaCO_3). Esta reação reduz a alcalinidade da argamassa. O ensaio de resistência à carbonatação teve por objetivo, determinar a influência do catalisador exausto de FCC como substituto parcial do cimento na resistência à carbonatação acelerada (para uma atmosfera com 5% de concentração de CO_2).

Na Figura 4.16, são apresentados os resultados obtidos no ensaio da resistência à carbonatação acelerada (descrito na secção 3.5.2.5) ao longo do tempo nas argamassas da série *Durabilidade*.

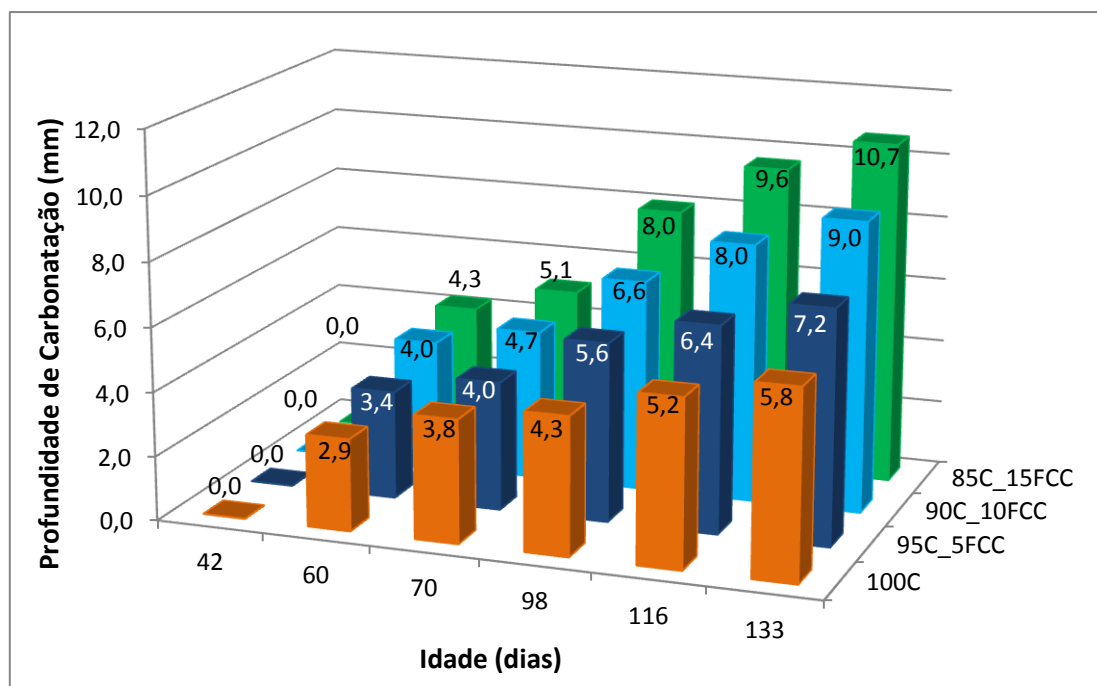


Figura 4.16- Resistência à carbonatação acelerada, da série de argamassas *Durabilidade*.

Ao observar os resultados registados na Figura 4.16 verifica-se que a profundidade de carbonatação da argamassa de referência (100C) é cerca de metade da profundidade de carbonatação de qualquer uma das outras argamassas estudadas. Na análise das argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC verifica-se que quanto maior é a percentagem deste incorporado na argamassa como substituto parcial do cimento, maior é a profundidade de carbonatação. Assim a incorporação do catalisador exausto de FCC parece facilitar a reação de carbonatação, contribuindo para uma menor resistência da argamassa à carbonatação. Na face dos provetes que durante o enchimento do molde fica exposta e que é rasada com a régua metálica, regista-se maior profundidade de carbonatação (como pode ser confirmado no Anexo I.1 – Profundidade de carbonatação nas diferentes faces dos provetes de cada argamassa). Um dos fatores que influenciou os elevados valores de profundidade de carbonatação foi o facto de a câmara de carbonatação se encontrar com uma atmosfera com concentração de CO₂ equivalente a 5% ao invés de 1% como indicado na norma e descrito na secção 3.5.2.5.

De facto, verifica-se o paradoxo das argamassas de cimentos com pozolanas conduzirem a maiores profundidades de carbonatação, embora estas argamassas exibam os poros mais refinados, diminuindo a permeabilidade à medida que as reações pozolânicas acontecem. Mas, por outro lado, nas argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC – que apresentam atividade pozolânica – ocorre a diminuição de alcalinidade da solução dos poros permitindo, deste modo,

uma mais fácil progressão do CO₂ para o interior da argamassa e consequentemente uma maior profundidade de carbonatação) [37, 39, 131, 132, 133, 134].

A norma NP EN 1504-03 requer para o ensaio de resistência à carbonatação acelerada uma concentração de 1% de CO₂, o que não foi possível. A concentração de CO₂ na câmara de carbonatação foi de 5% no ensaio realizado o que impossibilita a sua análise à luz da norma NP EN 1504-03 [63].

4.3.2.6 Ensaio de permeabilidade ao oxigénio

A permeabilidade ao oxigénio é uma das características mais importantes no que respeita à durabilidade pois esta permite comparar a interconectividade dos poros da matriz cimentícia para diferentes argamassas e a facilidade com que os poros são atravessados por gases através de diferentes mecanismos de transporte. Assim quanto mais refinada for a estrutura porosa da argamassa (menores diâmetros e volume de poros), menor será a permeabilidade ao oxigénio, e mais dificultada será a penetração de agentes agressivos.

Na Figura 4.17 são apresentados os valores do coeficiente de permeabilidade ao oxigénio obtidos aos 72 dias nas argamassas da série *Durabilidade*. Estes valores foram calculados a partir da equação 3.12 recorrendo aos resultados obtidos no ensaio de absorção capilar (descrito na secção 3.5.2.6).

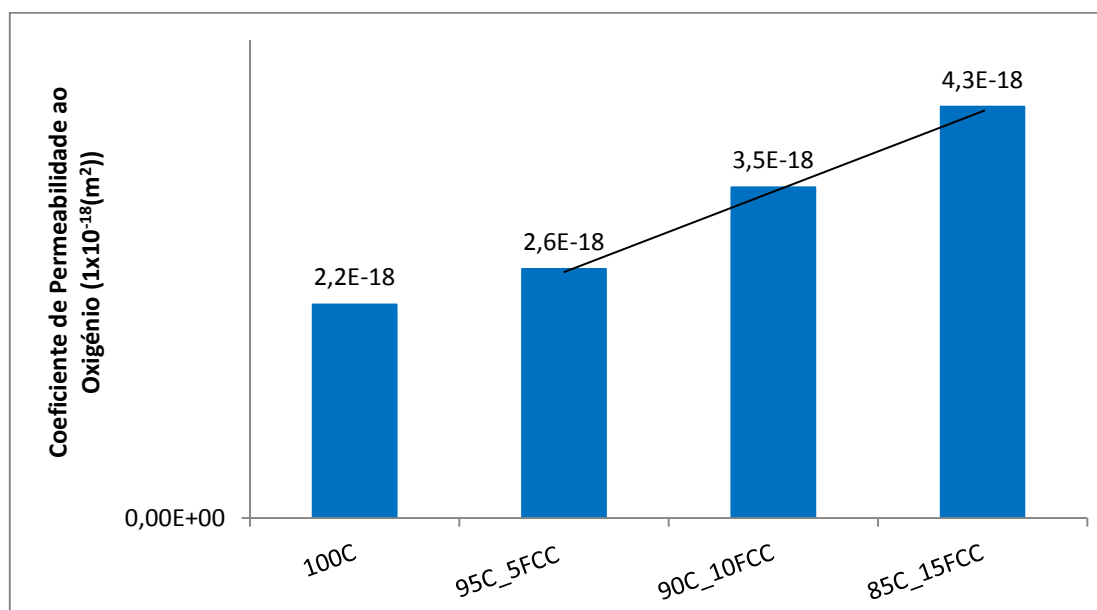


Figura 4.17- Permeabilidade ao oxigénio aos 72 dias da série *Durabilidade*. A reta de regressão linear representada corresponde à correlação verificada entre a permeabilidade ao oxigénio em função da percentagem de substituição parcial de cimento por catalisador exausto FCC.

Analisando os resultados obtidos e apresentados na Figura 4.17, verifica-se que o coeficiente de permeabilidade ao oxigénio obtido na argamassa de referência (100C) apresenta um coeficiente de permeabilidade ao oxigénio ligeiramente inferior quando comparado com as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC. Nas argamassas com a incorporação de catalisador exausto de FCC, o coeficiente da permeabilidade ao oxigénio aumenta com o aumento do teor de catalisador exausto de FCC, verificando-se a relação linear onde $R^2=1$ e expressa pela equação 4.9.

$$\text{Permeabilidade ao Oxigénio} = -2^{-19} \times (\% \text{ catalisador FCC incorporado}) + 2^{-18} \quad (\text{Eq.4.9})$$

Verificou-se que quanto maior a substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC maior o coeficiente de permeabilidade, comportamento que está de acordo com o elevado valor de profundidade de carbonatação que se constatou na secção 4.3.2.5 mas que parece contrariar os resultados da difusão de iões Cl^- verificados na secção 4.3.2.4. Refira-se contudo, que a penetração do CO_2 envolve o fenómeno da permeação dos gases e também da capilaridade, enquanto na penetração de cloretos o fenómeno de predominante será a difusão, ou seja, os mecanismos de transportes mais relevantes em cada situação não são os mesmos.

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões gerais

Neste capítulo são expostas as conclusões que foram sendo apresentadas ao longo da presente investigação que tem por objetivo avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores de catalisador exausto de FCC em características que influenciam a durabilidade de argamassas cimentícias para reparação estrutural e não estrutural. Por fim, são apresentados perspectivas de desenvolvimento futuro neste domínio.

A realização desta investigação englobou a preparação de argamassas com diferentes teores de catalisador exausto de FCC incorporado nomeadamente 5, 10 e 15%. As argamassas preparadas foram sistematizadas em duas séries que se designaram – “série *RAS*” que inclui areia reativa e a “série *Durabilidade*” cuja a areia utilizada é não reativa (conforme se apresentam na Tabela 3.1). Nas argamassas de ambas as séries foram efetuados ensaios no estado fresco e endurecido, para diferentes idades de cura. Os ensaios realizados estão sistematizados na Tabela 5.1.

As conclusões principais observadas a partir dos ensaios de estado fresco, são:

- Os resultados do ensaio de consistência por espalhamento (de acordo com a secção 4.2.1), efetuado nas argamassas da série *RAS* e *Durabilidade*, verificam que o aumento de percentagem de catalisador exausto de FCC incorporado na argamassa conduz à diminuição de trabalhabilidade. Este resultado pode ser atribuído à superfície específica das partículas constituintes do catalisador exausto de FCC originam uma elevada absorção de água;
- Os resultados do ensaio de massa volúmica (de acordo com a secção 4.2.2), efetuado para as argamassas da série *RAS* e *Durabilidade*, verificam que o aumento de percentagem de catalisador exausto de FCC incorporado na argamassa traduz uma diminuição da massa volúmica;
- Nos resultados do ensaio de teor de ar (de acordo com a secção 4.2.3), efetuado para as argamassas da série *RAS* e *Durabilidade*, verifica-se que a incorporação do resíduo na argamassa não tem efeito significativo;

As conclusões principais observadas a partir dos ensaios de estado endurecido, são:

- Os resultados do ensaio da reação álcalis-sílica acelerada (de acordo com a secção 4.3.1) verificam que com o aumento da incorporação de catalisador exausto de FCC aumenta a inibição à expansão, originada pela reação álcalis-

sílica. Este fenómeno pode ser atribuído ao facto dos iões álcalis existentes na solução intersticial dos poros da argamassa serem absorvidos pela estrutura porosa do resíduo FCC por meio de permuta catiónica;

- Nos resultados de resistência à flexão (de acordo com a secção 4.3.2.1) verifica-se que o aumento da incorporação de catalisador exausto de FCC na argamassa, origina uma menor a resistência a flexão;
- A resistência à compressão (de acordo com a secção 4.3.2.1) é afetada pela percentagem de catalisador exausto de FCC incorporado na argamassa, não sendo significativo em relação ao aumento da percentagem de incorporação de catalisador exausto de FCC. O aumento da resistência à compressão pode ser atribuível ao aumento de densidade, originado pela reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio e o catalisador exausto de FCC que forma C-S-H gel. As argamassas estudadas com incorporação de resíduo satisfazem os requisitos da norma NP EN 1504-03 para reparação estrutural e não estrutural, podendo vir a ser utilizada em qualquer uma classes (R4, R3, R2 e R1), como pode ser confirmado na Tabela 5.1;
- Na análise aos valores obtidos para o módulo de elasticidade à compressão (de acordo com a secção 4.3.2.2), avaliados em provetes prismáticos aos 28 dias de idade, verificou-se que com o aumento do teor de catalisador exausto de FCC incorporado diminui o módulo de elasticidade. No entanto, os valores obtidos cumprem os requisitos da norma NP EN 1504-03 para reparação estrutural e não estrutural, podendo vir a ser utilizada em qualquer uma classes (R4, R3, R2 e R1), conforme se pode verificar na Tabela 5.1;
- Nos resultados obtidos no ensaio de absorção capilar (de acordo com a secção 4.3.2.3) constata-se que o aumento do teor de catalisador exausto de FCC incorporado na argamassa, se traduz num menor coeficiente de absorção capilar. Esta diminuição pode ser consequência da reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio e o catalisador exausto de FCC formando-se C-S-H gel. Em princípio, a formação deste gel contribui para a diminuição de dimensão dos poros capilares, reduzindo a absorção capilar. As argamassas estudadas cumprem o requisito exigido, pois o coeficiente de absorção capilar é inferior a $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$, satisfazendo os requisitos da norma NP EN 1504-03 para reparação estrutural e não estrutural, podendo vir a ser utilizada em qualquer uma classes (R4, R3, R2 e R1), como se pode ser confirmado na Tabela 5.1;

- No que diz respeito à difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH) (de acordo com a secção 4.3.2.4), verifica-se que o aumento de catalisador exausto de FCC se traduz numa diminuição do coeficiente de difusão de cloretos em qualquer uma das argamassas estudadas. Pode ser atribuído à formação de produtos da reação pozolânica, C-A-S-H gel ou sal de Friedel (Fs) ($3\text{CaO}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$; $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) que contribuem para a densificação da matriz cimentícia, diminuindo a facilidade de difusão dos iões cloreto;
- A profundidade de carbonatação (de acordo com a secção 4.3.2.5) aumenta com a incorporação do teor de catalisador exausto de FCC. O ensaio realizado não pode ser analisado à luz da norma NP EN 1504-03, pois esta requer que a concentração de CO_2 na câmara de carbonatação seja de 1% e o ensaio foi realizado com uma percentagem de 5% de CO_2 ;
- Na avaliação da permeabilidade ao oxigénio (de acordo com a secção 4.3.2.6), constata-se que quanto maior o teor de incorporação do resíduo na argamassa maior a permeabilidade da argamassa, estando de acordo com os elevados valores de profundidade de carbonatação obtidos, mas que se opõe aos resultados obtidos na difusão de cloretos em regime não estacionário.

Na perspectiva de enquadrar normativamente todas as argamassas estudadas em ensaios, quer à luz da norma NP EN 1504-03 quer de acordo com os requisitos de outras normas (não contemplados pela norma NP EN 1504-03) - sistematizam-se, na Tabela 5.1, os resultados obtidos nas argamassas estudadas ao longo desta campanha experimental.

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Tabela 5.1 - Resultados obtidos nos ensaios de estado fresco e endurecido para as argamassas estudadas das séries - RAS e Durabilidade, requisitos das propriedades definidas pela norma NP EN 1504-03 e classificação das argamassas

Ensaio	Resultados								Requisitos norma NP EN 1504-3				Classificação	
	Série de argamassas de Durabilidade				Série de argamassa de RAS				(classe)					
	100C	95C_5FCC	90C_10FCC	85C_15FCC	RAS_100C	RAS_95C_5FCC	RAS_90C_10FCC	RAS_85C_15FCC	R4	R3	R2	R1		
Estado fresco	Diâmetro de espalhamento (mm)	223	218	207	188	174,6	171	166,7			*			
	Consistência por espalhamento (%)	-	-	-	-	217	213	206	202			*		
	Teor de ar (%)	5,1	4,4	4,9	5,7	5,0	5,1	4,9	5,2			*		
	Massa Volúmica (g/dm ³)	2223	2204	2188	2179	2097	2082	2082	2072			*		
Estado Endurecido	Reação álcali-silica (%)	-	-	-	-	0,43	0,33	0,26	0,23			*		
	Resistência à flexão (MPa)	7,9	7,7	7,6	7,5	-	-	-	-			*		
	Resistência à compressão (MPa)	69,5	70,5	71,4	69,2	-	-	-	-	≥45	≥25	≥15	≥10	R4,R3,R2,R1
	Módulo de Elasticidade à compressão	36,3	36,9	35,9	34,1	-	-	-	-	≥20	≥15	Sem requisitos	Sem requisitos	R4,R3,R2,R1
	Coefficiente de absorção capilar (kg/(m ² h ^{0,5}))	0,34	0,26	0,19	0,14	-	-	-	-	≤0,5			Sem requisitos	R4,R3,R2,R1
	Coefficiente de difusão de cloretos (1x10 ⁻¹² m ² /s)	10,6	9,8	9,4	8,2	-	-	-	-			*		
	Profundidade de carbonatação (mm)	5,4	7,3	9,0	10,7	-	-	-	-			*		
	Coefficiente de permeabilidade ao oxigénio (m ²)	2,2E ⁻¹⁸	2,6E ⁻¹⁸	3,5E ⁻¹⁸	4,3E ⁻¹⁸	-	-	-	-			*		

• os respetivos ensaios não são contemplados pela norma NP EN 1504-3

5.2 Recomendação de propostas de estudos futuros

A realização da presente investigação evidenciou uma série de questões por esclarecer. Neste sentido apresentam-se de seguida propostas de trabalhos futuros.

- Repetição da realização de ensaios álcalis-sílica acelerados em argamassa cimentícias, com diferentes razão a/c, de modo ao ensaio ser comparável aos outros ensaios da campanha experimental e confirmar o efeito da variação da razão a/c na argamassa;
- A realização de uma campanha experimental de durabilidade com uma razão a/c entre 0,3 e 0,4, para uma melhor compreensão do efeito da razão a/c em argamassas com a incorporação de catalisador exausto de FCC, nos valores de resistência mecânica, de absorção capilar, da difusão de cloretos em regime estacionário e não estacionário, da permeabilidade ao oxigénio, da resistência à carbonatação e do módulo de elasticidade;
- Estudar argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC, após a realização de ensaios difusão de cloretos em regime estacionário e não estacionário, de carbonatação e de reações álcalis-sílica, para uma melhor compreensão do comportamento deste, a nível da estrutura da matriz cimentícia e recorrendo à microscopia de varrimento eletrónico (MEV), difração por raio X (DRX), análise termogravimétrica (TGA) e porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP);
- Realizar ensaios de aderência, de retração e expansão impedida, de compactibilidade térmica e de coeficiente de dilatação térmica para avaliar se as argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC apresentam os requisitos de desempenho dos produtos de reparação de estruturas;
- Realizar ensaios para verificar a capacidade de resistência de argamassas com incorporação de catalisador exausto de FCC a ambientes agressivos (nomeadamente com sulfatos);

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Jimenez-Garcia, R. Quintana-Solórzano, R. Aguilar-López e R. Maya-Yescas, "Modeling Catalyst Deactivation by external Coke Deposition during Fluid Catalytic Cracking," *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 8, 2010.
- [2] T. Andrade e A. Silva, "Concreto: ensino, pesquisa e realizações," *IBRACON*, vol. 2, pp. 953-983, 2005.
- [3] "ebah," 2006. [Online]. Available: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAY_AAB/argamassas. [Acedido em 25 Setembro 2012].
- [4] A. A. d. Amorim, "Durabilidade das Estruturas de Concreto Aparente," Belo Horizonte, 2010.
- [5] P. K. Metha e P. J. Monteiro, *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*, São Paulo: IBRACON, 2008, pp. 12-14,121,122.
- [6] M. Carvalho, "Ancoragens pré-esforçadas em obras geotécnicas. Construção, ensaios e análise comportamental," 2009.
- [7] A. M. Martins, "Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco," Lisboa, 2008.
- [8] G. A. Rao, "Generalization of Abram's law for mortars," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 495-502, Março 2001.
- [9] Z. Banu e T. Nagaraj, "Generalization of Abram's law," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, Junho 1996.
- [10] I.-C. Yeh, "Generalization of strenght versus water-cementitious ratio relationship to age," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, 1865-1873 Outubro 2006.
- [11] C. Romano, *Apostila de Tecnologia do Concreto*, Paraná, 2004.
- [12] R. Araujo, E. Rodrigues e E. Freitas, *Materiais de Construção*, Rio de Janeiro, 2000.

- [13] H. Pereira e G. Martins, Execução de Estruturas de Betão - Materiais de Construção I, 2 ed., Lisboa, 2011.
- [14] D. S. Barin, "Carbonatação e Absorção Capilar em Concretos de Cimento Portland Branco com altos teores de adição de Escória de Alto-Forno e Activador Químico," Brasil, 2008.
- [15] P. Helene, "Contribuição no Estudo da Corrosão em armaduras de Concreto Armado," Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.
- [16] P. Metha e P. Monteiro, Concreto: estrutura, propriedades e materiais, São Paulo: PINI, 1994.
- [17] A. Neville, Propriedades do Concreto, 2ª ed., São Paulo: PINI, 1997.
- [18] A. Babak e S. Mohammad, "Use of natural Zeolite as a supplementary cementitious material," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, pp. 134-141, 2010.
- [19] C. Hall, "Water sorptivity of mortars and concretes: a review," *Magazine of Concrete Research*, pp. 51-61, 1989.
- [20] B. T. Frizo, "Influência do Teor da Finura de Pozolanas na Permeabilidade ao Oxigénio e na Absorção Capilar do Concreto," Santa Maria, RS, Brasil, 2001.
- [21] B. D. Ikotun, S. O. Ekolu e V. G. Freitas, "Effect of Modified Zeolite Additive on Properties of Cement Mortar," em *Proceedings of the second International Civil Engineering Conference on Civil Engineering and Sustainable Development*, 2008.
- [22] B. Uzal e L. Turanli, "Blended Cements Containing High Volume of Natural Zeolite: Properties, Hydration and Paste Microstructure," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, pp. 101-109, 2012.
- [23] C. Lee, M. McCarthy e R. Dhir, "Intrinsic Permeability of Fly Ash Concrete," em *International Conference on Durability of Concrete, fourth*, Sydney, 1997.
- [24] M. Khan, "Isoresponses for strength, permeability and porosity of high performance mortar," *Building and Environment*, vol. 38, pp. 1051-1056, 2003.
- [25] J. Castro e J. G. Martins, Patologia do Betão Reparação e Reforço de Estruturas, 1ª

- ed., Universidade Fernando Pessoa Lisboa, 2006.
- [26] C. Bhatt, J. Fonseca, M. Branco e P. Palma, "Monografia. Materiais de Reparação de Estruturas de Betão.," Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.
- [27] J. S. Coutinho, *Materiais de Construção 2 - 1ª Parte - Ligantes e Caldas*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.
- [28] J. S. Coutinho, *Excertos de "Melhoria da durabilidade do betão por tratamento da cofragem"*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1998.
- [29] M. Medeiros, E. Pereira e P. Helene, "Tratamento de superfície com silicato de sódio para concreto: penetração de cloreto e absorção de água," *Revista ALCONPAT*, vol. 2, pp. 157-169, Setembro - Dezembro 2012.
- [30] E. Zornoza, P. Garcés, J. Payá e A. Climent, "Improvement of chloride ingress resistance of OPC mortars by using spent cracking catalyst," *Cement and Concrete Research*, vol. 39, pp. 126-139, 2009.
- [31] E. Zornoza, J. Payá e P. Garcés, "Chloride induced corrosion of steel embed in mortar containing fly ash and spent cracking catalyst," *Corrosion Science*, vol. 50, pp. 1567-1575, 2008.
- [32] N. Meysam, S. Jafar, A. Babak e S. Mohammad, "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 1023-1033, 2012.
- [33] E. Zornoza, P. Garcés, M. Borrachero e J. Payá, "Durability Properties of Mortars Partially Substitute with Catalytica Cracking Catalyst," em *Second International Conference on Sustainable Construction materials and Technologies*, Universidade Politécnica de Marche, Ancona, Italy, 2010.
- [34] M. Fujiwara e K. Minosaku, "Repair methods for concrete bridges deteriorated by chloride ions," *The United States strategic highway research program*, pp. 125-134, 1990.
- [35] E. Figueiredo, "Efeito da Carbonatação e de Cloretos no Concreto," em *Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações*, São Paulo, IBRACON, 2005, pp. 829-855.

- [36] S. A. Bernel, R. M. Gutiérrez e J. L. Provis, "Carbonation of alkali-activated GBFS/MK concretes," em *International Congress on Durability of Concrete*, 2012.
- [37] E. Zornoza, P. Gracés, J. Monzó, M. Borrachero e J. Payá, "Accelerated carbonation of cement pastes partially substituted with fluid catalytic cracking residue (FC3R)," *Cement and Concrete Composite*, vol. 31, pp. 134-138, 2009.
- [38] O. Cizer, J. Canyforts, K. V. Balen, J. Elsen e D. V. Gemert, "Carbonation and Hydration of Calcium Hydroxide and Calcium Silicate Binder with Rice Husk Ash," em *Second International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*, Quebec City, Canada, 2006.
- [39] E. Zornoza, J. Payá, J. Monzo, M. Borrachero e P. Garcés, "The carbonation of OPC mortars partially substituted with spend fluid catalytic catalyst (FC3R) and its influence on their mechanical properties," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1323-1328, 2009.
- [40] M. Fernandes, "Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betão. Estudo de casos de obra.," Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2005.
- [41] T. R. 3, "Alkali Silica Reaction - Minimising the risk of damage to concrete, guidance notes and recommended practice," Cement and Concrete Association of New Zealand, 2003.
- [42] J. Fordaba, "Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón," Universidade da Catalunha, Barcelona, Espanha, 2005.
- [43] P. Metha, *Concrete, structures, properties and materials*, Englewood Cliffs: NJ Prentice-Hall, 1986.
- [44] T. Kennerley, "Corrosion resistance of concrete in a geothermal environment with special reference to the cooling tower proposed for Ohaaki," Chemistry Division Report, New Zealand Department of Scientific and Industrial Research, New Zealand, 1980.
- [45] C. Rogers, "Testing Canadian aggregates for alkali reactivity," em *International conference on concrete alkali-aggregate reactions*, Park Ridge, 1987.
- [46] M. Bérubé, J. Dorion, J. Duchesne, B. Fournier e D. Vezina, "Laboratory and field

- investigations of the influence of sodium chloride on alkali silica reactivity,” *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 77-84, 2003.
- [47] S. Prizskulnik, Pozolanas para aglomerantes de construção civil. Colectânea de trabalho sobre pozolanas e cimentos pozolânicos, Brasil: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1981.
- [48] M. B. Santo e J. Brito, O panorama nacional das reacções alcális sílica em betões, vol. 32, Universidade do Minho, 2008.
- [49] *Especificação LNEC, E461-2004 Metodologias para prevenir reacções expansivas internas.*
- [50] *Norma Europeia transposta para Portugal, NP EN 1504 - Produtos e sistemas para proteção e reparação de estruturas de betão.*
- [51] R. M. Ferreira, “Avaliação de Ensaios de Durabilidade de Construção,” Universidade do Minho Escola de Engenharia, Guimarães, 2000.
- [52] L. Bauer, Materiais de Construção, 5ª Edição ed., vol. 1, Rio de Janeiro, 2008.
- [53] V. Souza e T. Ripper, Patologia, recuperação e esforços de estruturas de concreto, São Paulo: PINI, 1998.
- [54] M. Marcelli, Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras, São Paulo: PINI, 2007.
- [55] C. Andrade e C. Alonso, “Vida útil e residual das estruturas de Hórmington,” em *Prevenção da corrosão das estruturas de betão. Seminário L.N.E.C.*, Lisboa, 1996.
- [56] EMOdico, Dicionário Técnico, European Mortar Industry Organization, 3ª Edição ed., 2001.
- [57] M. S. Ribeiro, “Argamassas cimentícias modificadas com polímeros como material de reparação,” em *Jornadas LNEC. Engenharia para a sociedade investigação e inovação cidades e desenvolvimento.*, Lisboa, 2012.
- [58] “Oje O Jornal Económico,” [Online]. Available: http://gecorpa.primeway.pt/Upload/SalaImprensa/jornal_oje.pdf. [Acedido em 28 Julho

- 2012].
- [59] P. Silva, “Argamassas de Reparação,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [60] M. Ribeiro, A. Gonçalves e A. Branco, “Styrene-butadiene polymer action on compressive and tensile strenghts of cement mortars,” *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 1263-1273, 2008.
- [61] M. Ribeiro, “Processos Tradicionais de Reparação da Corrosão em Estruturas,” em *Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armadao. Seminário. L.N.E.C.*, Lisboa, 1996.
- [62] *Norma Europeia transposta para Portugal, NP EN 196-1:2006 Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.*
- [63] *Norma Europeia tranposta para Portugal NP EN 1504-03:2006 - Produtos e Sistemas para protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 3: Reparação estrutural e não estrutural.*
- [64] *Norma Europeia transposta para Portugal NP EN 1504-9:2009 - Produtos e sistemas para protecção e reparação de estruturas de betão. Parte 9: Princípios gerais para a utilização de produtos e sistemas.*
- [65] C. Costa, “Ligantes Hidráulicos,” em *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção*, Lisboa, IST press, 2012, pp. 3-54.
- [66] *Norma Europeia transposta para Portugal, NP EN 197-1:2001 Cimento - Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, Caparica IPQ.*
- [67] C. Costa, P. A. Carvalho, J. Bordado e A. Nunes, “SciELO Portugal,” Julho 2009. [Online]. Available: http://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?pid=S0870-83122009000200006&script=sci_arttext. [Acedido em 14 Outubro 2012].
- [68] “Apfac,” 4 Maio 2012. [Online]. Available: <http://www.apfac.pt/layout.asp?area=3000>. [Acedido em 15 Junho 2012].
- [69] A. Velosa, Argamassa de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas, Aveiro: Universidade de Aveiro, 2006.

- [70] A. d. S. Coutinho, *Fabrico e propriedades do betão*, vol. 1, Lisboa: L.N.E.C., 1997.
- [71] I. Soroka, "Concrete in hot enviroments," E&FN Spon, National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering,, Technion, Institute of Technology, Haifa, Israel, 1993.
- [72] M. M. Johari, J. Brooks, S. Kahir e P. Rivard, "Influence of Supplementary Cimentitious Materialson Engineering Properties of high strenght concrete," *Construction of Cementitious Materials*, vol. 25, pp. 2639-2648, Maio 2011.
- [73] E. Guneyisi, M. Gesoglu e K. Mermerdas, "Improving strenght, drying shrinkage and pore of structure using metakaolin," *Material Structure*, vol. 41, pp. 937-949, 2008.
- [74] P. Chindraprasirt, C. Jatturapitakkul e T. Sinsiri, "Effect of fly ash fineness on compressive strenght and pore size of blended cement paste," *Cement and Concrete Composite*, vol. 27, pp. 425-428, 2005.
- [75] J. Khatib e S. Wild, "Pore size distribution of metakaolin paste," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp. 1545-1553, 1996.
- [76] Z. Li e Z. Ding, "Property improvement of Portland Cement by incorporating with metakaolin and slag," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 579-584, 2003.
- [77] A. Talah, F. Karchi, R. Chaid e A. Merida, "The influence of natural pozzolan content on Durability of high performance concrete," em *Sixth International Symposium on Advances in Science and Technology*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2012.
- [78] J. Payá, J. Monzo, M. Borrachero, F. Amahjour, I. Girbés, S. Velázquez e L. Ordóñez, "Advantages inthe use of fly ashes, in the cements containing pozzolanic combustion residues: silica fume, sewage sludge ash, spent fluidized bed catayst and rice husk ash," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 77, pp. 331-335, 2002.
- [79] P. Metha, "Studies on blended portland cements containing santorin earth," *Cement and Concrete Research*, vol. 11, pp. 507-518, 1981.
- [80] P. Metha e O. Gjov, "Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica fume," *Cement and Concrete Research*, vol. 12, pp. 587-595, 1982.
- [81] Z. Chengzhi, W. Aiquin e T. Minghu, "The filling role of pozzolanic material," *Cement*

- and Concrete Research*, vol. 6, pp. 943-947, 1996.
- [82] A. J. Maas, J. H. Ideker e M. C. Juenger, "Alkali silica reactivity of agglomerated silica fume," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, pp. 166-174, 2007.
- [83] M. Juenger e C. Ostertag, "Alkali-silica reactivity of large silica fume - derived particles," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1389-1402, 2004.
- [84] S. Diamond, S. Sahu e N. Thaulow, "Reaction products of densified silica fume agglomerate in concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1625-1632, 2004.
- [85] R. Rashetania, A. Dousti, B. Ahmadi, D. Kathomi e S. Mohammad, "Effect of natural zeolite and silica fume as a pozzolanica materials on the chloride difusio of concrete," em *International Congress on Durability of Concrete*, 2012.
- [86] S. Chandra e K. Bendapudi, "Contribution of fly ash to the properties of mortar and concrete," *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 04, pp. 1017-1023, Outubro 2011.
- [87] D. Jozic, J. Zelica e Janjantovic, "Influence of coarse fly ash on the mechanical properties of the ciment mortars," *Ceramics-Silikáti*, vol. 54, pp. 144-151, 7 Abril 2010.
- [88] C. Karakurt e I. B. Topçu, "Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete," *Construction and Building Material*, vol. 25, pp. 1789-1795, 2011.
- [89] L. Cordeiro, "Análise de variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a actividade pozolânica," Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, 2009.
- [90] K. Ganesan, K. Rajagopal e K. Tangovel, "Evaluation of bagasse ash as supplementary cimentitious material," *Cement and Concrete Composite*, vol. 29, pp. 515-524, 2007.
- [91] S. P. Sousa, "Betão eco-eficiente com cinza de casca de arroz," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.
- [92] J. Coutinho, "The confined benefits of CPF an RHA in improving the durability of concrete structures," *Cement and Concretetes Composites*, vol. 25, pp. 51-59, 2003.

- [93] C. M. Neto, "Absorção capilar e resistividade eléctrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico," Santa Maria, RS, Brasil, 2011.
- [94] A. H. Kath, G. O. Islabão, D. L. Paul, R. O. Sousa e L. C. Vahl, "Efeito residual da cinza de casca de arroz na disponibilidade de fósforo e silício no solo," em *XIV ENPOS*, Brasil, 2012.
- [95] G. H. Trindade, "Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reacção álcali-silica e penetração de cloretos," Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil 2011, 2011.
- [96] A. M. Proença, "A influência do metacaulino no controlo da reacção álcali-silica," em *1ª Jornada de materiais de construção*, Porto, Portugal, 2011.
- [97] A. Camões, P. Cruz, S. Jalali e R. Ferreira, "Aumento da Durabilidade do Betão através da utilização de metacaulino e látex - Um caso de estudo," em *Encontro Nacional de Betão Estrutural*, 2004.
- [98] J. Samapaio, J. S. Coutinho e M. N. Sampaio, "Melhoria de Desempenho de Betões pelo Metacaulino," em *43º Congresso Brasileiro do Concreto*, Foz do Iguaçu, Brasil, 2001.
- [99] Q. Niu e N. Feng, "Effect of modified zeolite on the expansion of alkaline silica reaction," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1784-1788, 2005.
- [100] "CSMA," [Online]. Available: <http://www.ukcsma.co.uk/durability.html>. [Acedido em 19 Julho 2012].
- [101] D. Ribeiro, A. Silva, J. Labrincha e M. Morelli, "Estudo das reacções álcalis-silica associada ao uso de lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento," *Cerâmica*, vol. 58, pp. 90-98, 2012.
- [102] D. V. Ribeiro, "Influência da adição da lama vermelha nas propriedade e na corrosibilidade do concreto armado," Universidade Federal de São Carlos, Brasil, 2010.
- [103] "Portal laboratórios virtuais de processos químicos - Caso de Estudo," [Online]. Available: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=224

- &Itemid=415>. [Acedido em 19 Outubro 2012].
- [104] N. Brito, C. Costa e M. S. Ribeiro, “A new research program on FCC in cement mortars for structural repair,” em *International Conference Durable Structures - From construction to rehabilitation*, Lisboa, 2012.
- [105] R. Meyers, *Handbook of Petroleum Refining Process*, 3ª Edição ed., McGraw-Hill Professional, 2003.
- [106] J. Payá, J. Monzo e M. Borrachero, “Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) an excellent mineral by- product improving early-strenght development of cement mixtures,” *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1773-1779, 1999.
- [107] J. Payá, J. Monzo, M. Borrachero, Velázquez e M. Bonilla, “Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue thermogravimetric studies analysis studies on (FC3R) - lime pastes,” *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1085-1091, 2003.
- [108] M. Lomas, M. S. Rojas e M. Frias, “Pozzolanic reaction of a spent fluid catalytic cracking catalyst in FCC - cement mortars,” *Journal of thermal analysis and calorimetry*, vol. 90, pp. 443-447, 2007.
- [109] R. G. Faustino, “Produção de argamassas de cimento com incorporação de um resíduo da refinação de petróleo,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [110] M. I. Conceição, “Reutilização de catalisador exausto da indústria petroquímica com materiais à base de cimento,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [111] C. Costa, M. Juenger e P. Carvalho, “Microstructural analysis of cement pastes blende with waste catalyst from oil refinery,” em *EUROMAT 2009 - European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes*, Glasgow, UK, 2009.
- [112] *Norma americana, ASTM C 1260-07 - Standart test method for potential alkaly reactivity aggregates (Mortar - Bar Method)*.
- [113] *Norma Americana, ASTM C1260-94 - Ensaio de avaliação da reactividade potencial aos álcalis de agregado para betão (método da barra de argamassa)*.
- [114] D. Silva, “Optimização de caldas de cimento para trabalhos de injeccção em geotecnia,”

Lisboa, 2010.

- [115] W. J. d. Santos, “Argamassa de alto desempenho,” Juiz de Fora, Brasil, 2011.
- [116] R. B. Oliveira, “Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidros - efeito de filler e pozolânico,” Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.
- [117] *Norma americana, ASTM C1437-07 - Standard test method flow of hydraulic mortar.*
- [118] *Norma americana, ASTM C230-90 - Stant specification for flow table for use in tests of hydraulic cement.*
- [119] *Norma Europeia transporta para Portugal, NP EN 12350-06:2002 - Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica.*
- [120] *Norma Americana, ASTM C231-09 - Air content of freshly mixed concrete by the pressure method..*
- [121] *Norma americana, ASTM C490-09 - Use of apparatus for the determination of lenght change of hardened cement paste, mortar, and concrete.*
- [122] *Norma Europeia EN 13412:2006 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test method. Determination of modulus of elasticity in comprression.*
- [123] *Norma Europeia prEN 13057:2001 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance of capillary absortion.*
- [124] *Especificação LNEC, E463-2004, Betão - Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.*
- [125] *Norma Europeia transposta para Portugal, NP EN 13295:2004 - Products and systems for the protection and repair concrete strctures - Test Methods - Determination of resistance to carbonation.*
- [126] *Especificação LNEC, E392-1993, Betões - Determinação da permeabilidade ao oxigénio.*
- [127] *CEMBUREAU Recommendation - The determinationof the permeability of concrete to*

- oxygen by the Cembureau method*, 1989.
- [128] F. N., Q. Niu e E. Chen, "Study on the supression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction," *Magazine Concrete Research*, vol. 50, pp. 17-21, 1998.
- [129] *Norma Americana, ASTM C311-07:2007 - Standart test method for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete.*
- [130] R. Geada e C. Costa, "Efeito da incorporação de resíduo da indústria petrolífera nas propriedades mecânicas de argamassas," *4º Congresso Português de Argamassas e ETICS*, 2012.
- [131] C. Kasmierczak, "Contribuição para análise de eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objectivo de protecção contra a carbonatação," Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 1995.
- [132] M. Vagheti e G. Isaia, "Concreto de alto desempenho com misturas pozolânicas: um estudo sobre a influência da carbonatação," em *5º Congresso Brasileiro de Cimento*, Brasil, 1999.
- [133] A. Gastaldini, "Influência da finura da escória na carbonatação de concretos com adições minerais," em *5º Congresso Brasileiro de Cimento*, Brasil, 1999.
- [134] C. Alonso e C. Andrade, "Corrosion of steel reinforcement in carbonated mortar containing chlorides," *Advances in Cement Research*, pp. 155-163, 1988.

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

ANEXOS

Anexo A – Planeamento das atividades experimentais

A.1 - Calendarização e descrição das respectivas tarefas pertencentes a cada campanha experimental

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo B – Ficha de Materiais

B.1 – Cimento Portland

B.2 – Agregado – Brita

B.3 – Agregado – SNL

B.4 – Superplastificante – Sika 898

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo B.1 – Cimento Portland

► Utilizações recomendadas

- **Betão armado**
Indicado indistintamente para todas as classes de resistência com especial vantagem nas de C30/37 a C45/55
Com desempenho mecânico elevado a 28 dias
- **Pré-fabricação**
Elementos estruturais em betão armado e pré-esforçado
- **Pavimentos rodoviários**
Camadas de desgaste para pavimentos fortemente solicitados
- **Caldas de injeção de uso generalizado**

► Acondicionamento



Pallet
49 Sacos de 35 kg = 1715 kg



Pacote
55 Sacos de 35kg = 1925 kg

Camião de 25 toneladas com meios de descarga próprios devidamente habilitado



Granel
25 toneladas

► Precauções na aplicação

- Evitar tempos de transporte elevados no caso de betão pronto
- Respeitar as dosagens de cimento mínimas e as relações água/cimento máximas normativas
- Assegurar uma cura e protecção adequadas de acordo com as disposições normativas
- Betonagem em tempo quente e seco

► Contra-indicações

- Contacto com ambientes agressivos (águas e solos)
- Betonagem em grandes massas
- Argamassas de uso geral

► Ambiente e Segurança

- Usar vestuário de protecção, luvas e equipamento protector para a vista/face adequados
- Quando ensacado contém redutor de crómio (VI) cujo período de eficácia é de dois meses após a data de ensacagem
- Para mais informações, consulte a Ficha de Dados de Segurança



ÁREA COMERCIAL
Av. Sventana Fátima, 8 - Edifício CIMPOR • 2680-514 PORDO VELHO
TEL: 21 940 45 43 • Fax: 21 940 47 60

ÁREA TÉCNICO-COMERCIAL
Av. Sventana Fátima, 8 - Edifício CIMPOR • 2680-514 PORDO VELHO
TEL: 21 940 45 43 • Fax: 21 940 47 54

ENCOMENDAS, CONTROLO DE VENDAS E CRÉDITO
L. Póvoa do Varzim - Apartado 1032 - 4445-800 OVAR
TEL: 22 958 40 00 • Fax: 22 967 19 26

www.cimpor.pt
Dcomerc@cimpor.pt

Anexo B.2 – Agregado – Brita



Lena Agregados, S.A.
Quinta da Sardinha - Apartado 1014 Santa Catarina da Serra
2496-907 Santa Catarina da Serra - Portugal



04

Rev.04

Ficha Técnica de Produto

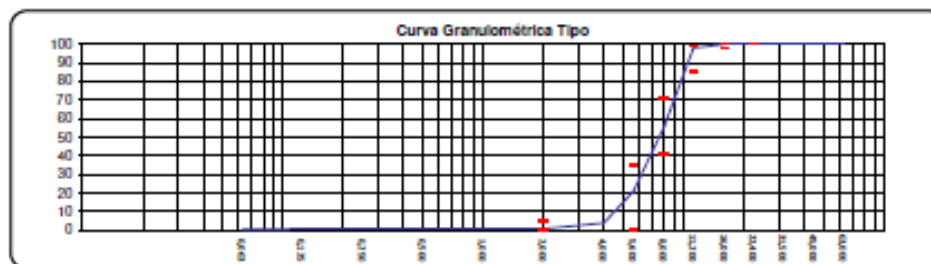
Produto: Seixo Brita Nº1 FB (5,6/11,2 mm) **Centro de Produção:** Foros de Benfica

Norma de Produto: NP EN 13043:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
90,000	100		
63,000	100		
45,000	100		
31,500	100		
22,400	100	100	100
16,000	100	98	100
11,200	98	85	99
8,000	56	41	71
5,600	21	0	35
4,000	4		
2,000	1	0	5
1,000	1		
0,500	1		
0,250	1		
0,125	1		
0,063	0,6		


Características	NP EN 13043
Certificados	1592-CPD-0209
Dimensão (d/D)	5,6/11,2 mm
Granulometria	G _{0,85/35}
Tolerância da Granulometria Típica	G _{0,915}
Teor de Finos	f ₁
Qualidade dos Finos	NA
Índice de Achatamento	FI ₁₅
Índice de Forma	SI ₁₅
% Superfície esmagada ou partida	C _{0,075}
Coefficiente de Los Angeles	LA ₂₀
Coefficiente de micro-Deval	M ₁₀₀₋₁₀
Coefficiente de Polimento Acelerado	PSV ₂₄
Massa Volumica	
material impermeável	2,54 Mg/m ³
partículas secas em estufa	2,59 Mg/m ³
partículas saturadas	2,60 Mg/m ³
Absorção de Água	0,7 %
Baridade	1,42 Mg/m ³
Percentagem de Vazios	45 %
Teor de Cloretos	NA
Teor de Sulfuretos	NA
Reacção álcalis-silica	NA
Sulfatos solúveis em ácido	NA
Teor de Enxofre	NA
Teor de Humus	NA
Teor de Ácido Fúlvico	NA
Contaminantes Lavas	NA
Contaminantes orgânicos pelo método da argamassa	
Aumento do tempo de presa	NA
Diminuição da resistência à compressão aos 28 dias	NA
Retracção por secagem	NA

Observações: NA - Não aplicável



Elaborou: (ORIGINAL ASSINADO) Aprovou: (ORIGINAL ASSINADO) Emitido: 24-05-2010

Anexo B.3 – Agregado – SNL



Société Nouvelle du Littoral

Siège Social & Usine : Z.A. – BP 9 – 11370 LEUCATE (France)
Tél. : 33 (0) 4 68 40 14 05 – Fax : 33 (0) 4 68 40 92 72
Internet : www.s-nl.fr - e-mail : contact@snl.fr • sn.l@wanadoo.fr

SABLE NORMALISE CEN
CERTIFIE CONFORME –
EN 196-1 par l'AFNOR et conforme ISO 679

**SABLE NORMALISE CEN CERTIFIE
CONFORME EN 196-1
SABLE NORMALISE ISO
CONFORME ISO 679**

Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des Matériaux
de la Ville de Paris (L.E.M.V.P.)
4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy
75014 PARIS

Méthodes d'essais des ciments
Sable pour mesure des résistances mécaniques

1- CARACTERISTIQUES

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondi. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1 350 ± 5 g.

Les livraisons se font à l'unité carton de 16 sachets pesant 21.6 kg et sur palette de 2 à 54 cartons, protégés par une housse en polyéthylène (transport routier) ou en carton renforcé (transport maritime).

2- CONTROLES

La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 (§ 5) et ISO 679 : 2009 (§ 5).



Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 (§ 11) et ISO 679 : 2009 (§ 11).


3- CONFORMITE

La conformité à la norme est contrôlée par le L.E.M.V.P. (Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris), 4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy - 75014 PARIS

Le certificat de conformité à la norme Européenne est délivré par l'AFNOR (Association Française de Normalisation), 11 Rue Francis de Pressensé – 93571 La Plaine Saint Denis Cédex.



S.M.L. fondée en 1916 – SAS capital 258 806 € - IM PR 83 076 759 257 - SIRET 076 759 257 00025 APE 6812Z
Certifiée pour la PRÉPARATION DU SABLE NORMALISÉ CEN POUR LA DÉTERMINATION DES RÉSISTANCES MÉCANIQUES DES CEMENTS



NF2-10111 FR

Anexo B.4 – Superplasticante

Construction

Ficha de Produto
Edição de Abril de 2011
Nº de identificação: 01.111
Versão nº 1
SikaPlast® 898


CE

SikaPlast® 898

Powered by ViscoCrete®

Superplasticante de elevado desempenho

Descrição do produto	SikaPlast® 898 é um superplasticante forte redutor de água para betão.
Utilizações	<p>SikaPlast® 898 permite obter uma muito forte plastificação e uma longa manutenção da consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.</p> <p>SikaPlast® 898 permite a fabricação de:</p> <ul style="list-style-type: none">■ Betões plásticos e fluidos.■ Betões com diferentes razões A/C.■ Betão bombeado para longas distâncias.■ Betão com agregados britados.■ Prefabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ. <p>Nos betões fluidos, SikaPlast® 898 confere à composição uma boa robustez às variações da água e dos diferentes constituintes e assim melhora a estabilidade, limitando os riscos de segregação, comparando com os adjuvantes inicialmente desenvolvidos à base de policarboxilatos.</p>
Características/Vantagens	<p>SikaPlast® 898 é um superplasticante/forte redutor de água que confere ao betão as seguintes propriedades:</p> <ul style="list-style-type: none">■ Excelente trabalhabilidade conjugada com o elevado desempenho a nível do desenvolvimento das resistências.■ Alta redução de água, conforme a dosagem e a composição; daqui resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compactidade elevada e de permeabilidade muito baixa.■ Boas resistências iniciais e finais.■ Excelente performance quer usado sozinho como combinado com outros adjuvantes.■ Maior robustez contra variações nos agregados e/ou diferentes tipos de cimento.■ Bom aspecto da superfície na descofragem■ Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em prefabricação, com bom desenvolvimento de resistências. <p>SikaPlast® 898 é isento de cloratos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-estorado.</p>
Certificados/Boletins de Ensaio	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.
Dados do produto	
Aspecto / Cor	Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.
Fornecimento	214 kg (200 litros); 1070 kg (1 m ³); granel.




SikaPlast® 898 1/3

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Armazenagem e conservação	O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada, a temperaturas entre +5 °C e +30 °C. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.
Dados técnicos	
Base química	Combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa.
Massa volúmica	1,07 ± 0,02 kg/dm ³ (a +23 ±2 °C)
pH (23 ± 2°C)	5,0 ± 1,0.
Teor de sólidos	32,0 ± 2,0 %.
Teor em íões cloreto	≤ 0,1%.
Informação sobre o sistema	
Pormenores de aplicação	
Consumo / Dosagem	Conforme o objectivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens: <ul style="list-style-type: none"> ■ Dosagem corrente: 0,5% a 1,5% do peso do cimento. ■ Dosagens especiais: 1,5% a 2,0% do peso do cimento.
Mistura	Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de ² / ₃ da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energeticamente cerca de 1 minuto/m ³ ; só então será adicionada mais alguma água até à consistência desejada. Este processo conduz ao aproveitamento máximo do adjuvante e permite controlar convenientemente a razão água/cimento. Se o processo não for viável, então adicionar o produto à água de amassadura previamente determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogénea. É importante garantir um tempo mínimo de 1,5 a 2 minutos de amassadura, para obter o efeito pleno do adjuvante. Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia). É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão. No caso de redosagem em obra, deve haver o cuidado de homogeneizar bem o adjuvante na massa do betão. Para isso, recomenda-se uma muito pequena adição de água no recipiente que contém o adjuvante, apenas para reduzir a sua viscosidade e facilitar a sua boa incorporação. O betão deve ser "puxado" acima e o adjuvante deve ser adicionado lentamente, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário, inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneização. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.
Aplicação	SikaPlast® 898 permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação, a cura do betão e validada a sua aplicabilidade às condições locais.
Compatibilidade	SikaPlast® 898 pode ser combinado com os seguintes produtos: <ul style="list-style-type: none"> ■ Sika® FerroGard® 901. ■ Sika® Pump. ■ Sika® Ragid ■ Sikacrete®. Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.
Limpeza de ferramentas	Limpar todas as ferramentas e equipamento com água imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.






Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Construction	Importante	<ul style="list-style-type: none">■ Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem ótima do adjuvante e sempre que se altere os componentes do betão ou a própria composição.■ Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se. <p>Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.</p>
	Nota	Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.
Risco e segurança		
Medidas de segurança	Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.	
<p>"O produto está seguro se Cº Seguro XI. Insurance Switzerland (Apólice nº CH0003018LJ05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".</p> <p>A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações de Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia e respeito de comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas feitas estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedido.</p>		
Marcação CE	<p>A Norma Europeia EN 934-2:2003 "Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem" especifica as definições e os requisitos dos adjuvantes para uso no betão. Abrange adjuvantes para betão simples, armado e pré-esforçados usados no betão fabricado no local da obra, no betão pronto e no betão fabricado em centrais de produção de elementos prefabricados.</p> <p>Nesta norma os requisitos de desempenho aplicam-se a adjuvantes usados no betão de consistência normal. Eles podem não ser aplicáveis a adjuvantes para outros tipos de betão tais como betões meio secos e de consistência terra húmida.</p>	



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

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



SikaPlex® 898 3/3

Anexo C - Consistência por espalhamento

C.1 – Consistência por espalhamento da série *RAS* para os diversos ensaios

C.2 – Consistência por espalhamento da série *Durabilidade* para os diversos ensaios

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo C.1 – Consistência por espalhamento (mm) da série RAS para os diversos ensaios

Espalhamento das argamassas do Ensaio de RAS				
Argamassa	Medição do espalhamento nas 3 direcções			Média
	d1	d2	d3	
100C	174	175	174,8	174,6
95C_5FCC	171	170,5	171,3	171
90C_10FCC	166,7	166,5	166,9	166,7
85C_15FCC	161,6	161,7	161,7	161,7

Espalhamento das argamassas do Ensaio de Teor de ar da RAS				
Argamassa	Medição do espalhamento nas 3 direcções			Média
	d1	d2	d3	
100C	174,6	174,4	174,8	174,6
95C_5FCC	170	171,8	171,4	171
90C_10FCC	165,5	166,8	167,8	166,7
85C_15FCC	160,8	162	162,4	161,7

Anexo C.2 – Consistência por espalhamento da série *Durabilidade* (mm) para os diversos ensaios

Espalhamento das argamassas do Ensaio de Resistência Mecânica				
Argamassa	Medição do espalhamento nas 3 direcções			Média
	d1	d2	d3	
100C - 1ª Amassadura	224	222	223	223
100C - 2ª Amassadura	222,5	222,5	224	223
95C_5FCC - 1ª Amassadura	219	217	218	218
95C_5FCC - 2ª Amassadura	217,5	217,6	218	218
90C_10FCC - 1ª Amassadura	205,7	207	208	207
90C_10FCC - 2ª Amassadura	207	207,1	207	207
85C_15FCC - 1ª Amassadura	186,5	188,5	188	188
85C_15FCC - 2ª Amassadura	188	188,3	188,1	188

Espalhamento das argamassas do Ensaio de Absorção Capilar				
Argamassa	Medição do espalhamento nas 3 direcções			Média
	d1	d2	d3	
100C	221,5	224	223,5	223
95C_5FCC	218	218	218	218
90C_10FCC	207	206	208	207
85C_15FCC	187	188,6	188	188

Espalhamento das argamassas do Ensaio de Módulo de Elasticidade				
Argamassa	Medição do espalhamento nas 3 direcções			Média
	d1	d2	d3	
100C	223	223,5	222,3	223
95C_5FCC	219	217,8	217,5	218
90C_10FCC	206,8	207,5	207	207
85C_15FCC	186	189,5	188	188

Espalhamento das argamassas do Ensaio de Resistência à Carbonatação				
Argamassa	Medição do espalhamento nas 3 direcções			Média
	d1	d2	d3	
100C	222,5	222,6	223,5	223
95C_5FCC	218,5	218	217,4	218
90C_10FCC	208	207	207	207
85C_15FCC	187,8	188,3	188	188

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Espalhamento das argamassas do Ensaio de Permeabilidade ao Oxigénio				
Argamassa	Medição do espalhamento nas 3 direcções			Média
	d1	d2	d3	
100C	223	222,5	223,5	223
95C_5FCC	217,8	217,9	218,4	218
90C_10FCC	206,5	207,5	207	207
85C_15FCC	188	187,7	188,5	188

Espalhamento das argamassas do Ensaio de Difusão de Cloretos				
Argamassa	Medição do espalhamento nas 3 direcções			Média
	d1	d2	d3	
100C	223	223	223	223
95C_5FCC	218	218,3	218	218
90C_10FCC	207,3	207	207,1	207
85C_15FCC	187,8	188	189,5	188

Espalhamento das argamassas do Ensaio de Teor de ar Durabilidade				
Argamassa	Medição do espalhamento nas 3 direcções			Média
	d1	d2	d3	
100C	222,6	222,8	223	223
95C_5FCC	216,9	218,4	218,6	218
90C_10FCC	206,8	207,3	207	207
85C_15FCC	188,6	187,8	188	188

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexos D - Reação álcalis-sílica

D.1 – Reação Álcalis-Sílica – registo das expansões ocorridas nas várias idades de leitura para cada provete de cada família de argamassas

D.2 – Reação Álcalis-Sílica – diferença das expansões ocorridas relativamente à idade 0 para cada provete de cada família de argamassas

D.3 – Reação Álcalis-Sílica – médias das expansões relativamente à idade 0 para família de argamassas

D.4 – Reação Álcalis-Sílica – registo do ganho de massa ocorridas nas várias idades de leitura para cada provete de cada família de argamassas

D.5 – Reação Álcalis-Sílica – média do ganho de massa ocorridas nas várias idades de leitura para cada família de argamassas

D.6 – Reação Álcalis-Sílica – média do ganho de massa, relativamente à idade 0, ocorridas nas várias idades de leitura para cada família de argamassas

D.7 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus Ganho de massa dia 1

D.8 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus Ganho de massa dia 4

D.9 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus Ganho de massa dia 6

D.10 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus Ganho de massa dia 8

D.11 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus Ganho de massa dia 11

D.12 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus Ganho de massa dia 14

D.13 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus Ganho de massa dia 18

D.14 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus Ganho de massa dia 22

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo D.1 – Reação Álcalis-Sílica – registo das expansões (mm) ocorridas nas várias idades de leitura para cada provete de cada argamassa

Série de argamassa RAS	Provetes	Idades de leitura (expansão)										
		1 dias	2 dias	3 dias	6 dias	8 dias	10 dias	13 dias	16 dias	20 dias	24 dias	30 dias
100C	A	2,806	2,912	2,961	3,128	3,254	3,355	3,502	3,579	3,780	3,822	3,985
	B	2,791	2,922	2,961	3,143	3,293	3,381	3,545	3,616	3,850	3,977	4,082
	C	2,745	2,880	2,909	3,046	3,222	3,284	3,426	3,506	3,700	3,803	3,909
95C_5FCC	A	2,573	2,755	2,741	2,832	2,906	2,948	3,112	3,206	3,324	3,434	3,333
	B	2,849	3,002	3,000	3,097	3,170	3,212	3,369	3,454	3,566	3,676	3,573
	C	2,925	3,050	3,047	3,145	3,209	3,272	3,399	3,475	3,572	3,696	3,573
90C_10FCC	A	2,898	3,064	3,046	3,115	3,182	3,181	3,343	3,413	3,518	3,594	3,490
	B	2,826	2,974	2,936	3,003	3,062	3,070	3,220	3,288	3,381	3,460	3,347
	C	2,220	2,385	2,351	2,432	2,495	2,487	2,620	2,682	2,763	2,835	2,700
85C_15FCC	A	2,420	2,595	2,580	2,360	2,680	2,677	2,821	2,877	2,955	3,025	2,889
	B	2,847	2,980	2,966	3,034	3,082	3,092	3,219	3,272	3,357	3,424	3,281
	C	2,831	2,922	2,940	3,007	3,070	3,068	3,202	3,250	3,332	3,400	3,26

Anexo D.2 – Reação Álcalis-Sílica – média das expansões

Série de argamassa RAS	Provetes	Média de Expansão (mm)									
		2 dias	3 dias	6 dias	8 dias	10 dias	13 dias	16 dias	20 dias	24 dias	30 dias
100C	A	2,8	2,9	2,9	3,1	3,3	3,3	3,5	3,6	3,8	3,9
	B										
	C										
95C_5FCC	A	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6
	B										
	C										
90C_10FCC	A	2,6	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	3,1	3,1	3,2	3,3
	B										
	C										
85C_15FCC	A	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,1	3,1	3,2	3,3
	B										
	C										

Anexo D.3 – Reação Álcalis-Sílica – expansão em percentagem relativamente à idade 2 dias para cada argamassa

Série de argamassa RAS	Provetes	Expansão (%)									
		2 dias	3 dias	6 dias	8 dias	10 dias	13 dias	16 dias	20 dias	24 dias	30 dias
100C	A	0,00	0,05	0,07	0,13	0,19	0,22	0,28	0,31	0,40	0,43
	B										
	C										
95C_5FCC	A	0,00	0,06	0,06	0,10	0,13	0,14	0,20	0,24	0,28	0,33
	B										
	C										
90C_10FCC	A	0,00	0,06	0,05	0,08	0,11	0,11	0,17	0,19	0,23	0,26
	B										
	C										
85C_15FCC	A	0,00	0,05	0,05	0,04	0,10	0,10	0,15	0,17	0,21	0,23
	B										
	C										

Anexo D.4 – Reação Álcali-Sílica – Registo do aumento de massa ocorridas nas várias idades de leitura para cada provete de cada argamassa

Série de argamassa RAS	Provetes	Idades de leitura (massa)										
		1 dias	2 dias	3 dias	6 dias	8 dias	10 dias	13 dias	16 dias	20 dias	24 dias	30 dias
100C	A	419,70	420,55	421,03	424,15	425,88	426,30	427,56	427,88	428,45	428,73	428,81
	B	426,19	427,10	428,06	431,24	432,20	432,45	433,53	433,50	434,18	434,15	434,23
	C	416,84	417,78	418,71	421,64	423,54	423,90	424,88	425,13	425,86	425,82	426,41
95C_5FCC	A	416,56	417,43	418,33	420,23	422,08	423,21	424,42	425,05	425,63	425,95	426,10
	B	427,44	428,40	429,50	431,15	433,31	434,19	435,12	435,68	436,17	436,57	436,68
	C	422,95	423,82	424,52	426,39	428,22	429,11	430,10	430,79	431,23	431,63	431,83
90C_10FCC	A	413,57	414,70	415,85	417,87	419,50	420,34	421,10	421,72	422,38	422,74	423,02
	B	415,13	416,21	417,39	419,08	420,89	421,09	422,06	422,88	423,33	423,79	424,14
	C	414,43	415,41	416,45	418,36	419,92	420,13	421,45	422,23	423,33	423,07	423,30
85C_15FCC	A	416,72	417,89	419,25	421,51	422,50	423,48	424,29	425,03	425,71	426,11	426,05
	B	418,48	419,37	420,35	422,83	423,30	424,33	425,32	425,90	426,65	427,02	427,10
	C	426,94	428,02	429,14	431,47	432,13	432,87	433,90	434,57	435,25	435,43	435,38

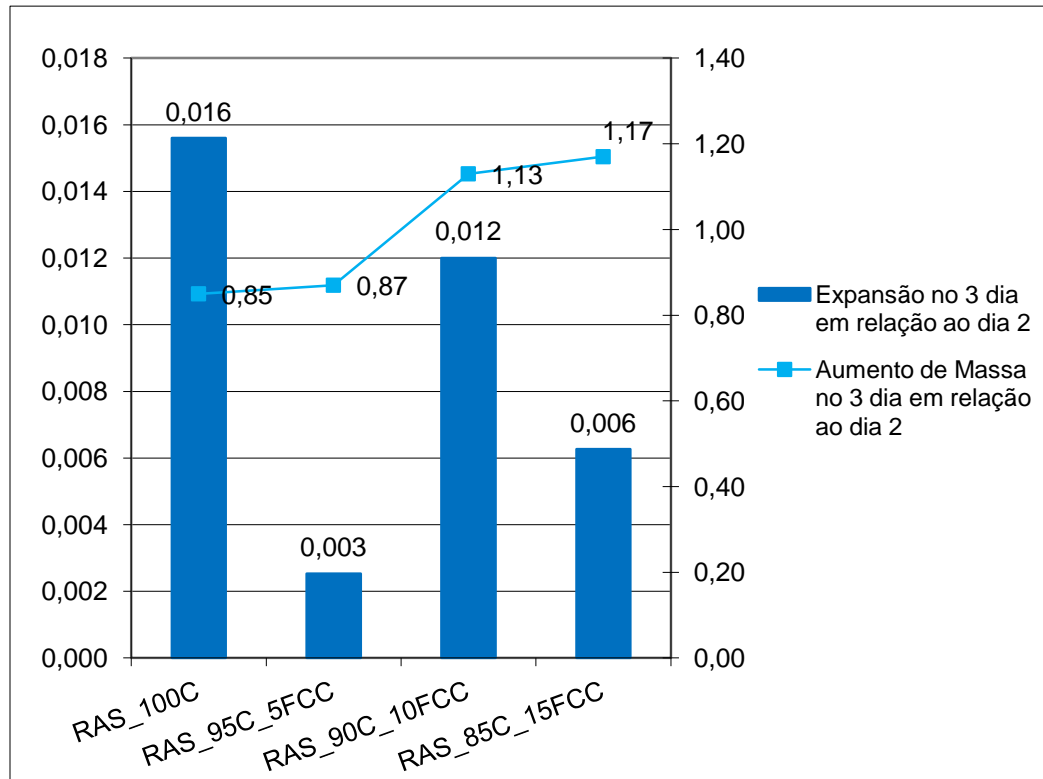
Anexo D.5 – Reação Álcali-Sílica – média do aumento de massa ocorridas nas várias idades de leitura para cada argamassa

Série de argamassa RAS	Provetes	Idades de leitura (massa)									
		2 dias	3 dias	6 dias	8 dias	10 dias	13 dias	16 dias	20 dias	24 dias	30 dias
100C	A	421,8	422,6	425,7	427,2	427,6	428,7	428,8	429,5	429,6	429,8
	B										
	C										
95C_5FCC	A	423,2	424,1	425,9	427,9	428,8	429,9	430,5	431,0	431,4	431,5
	B										
	C										
90C_10FCC	A	415,4	416,6	418,4	420,1	420,5	421,5	422,3	423,0	423,2	423,5
	B										
	C										
85C_15FCC	A	421,8	422,9	425,3	426,0	426,9	427,8	428,5	429,2	429,5	429,5
	B										
	C										

Anexo D.6 – Reação Álcalis-Sílica – média do aumento de massa, relativamente à idade 2, ocorridas nas várias idades de leitura para cada argamassa

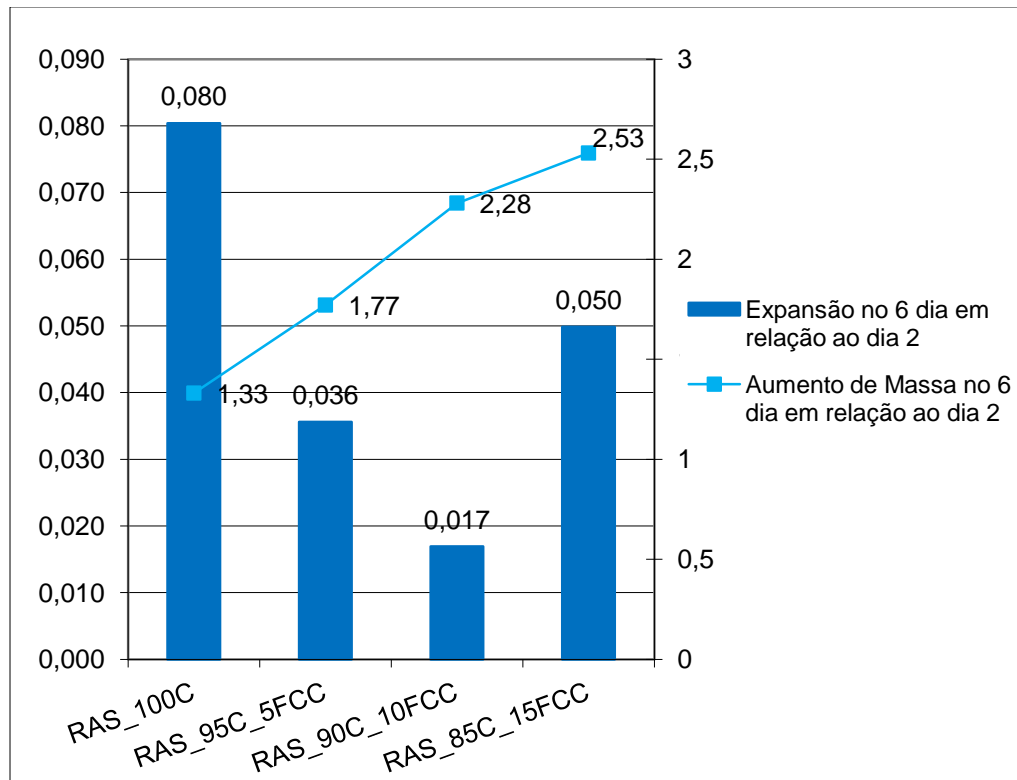
Série de argamassa RAS	Provetes	Medição do Aumento de Massa relativo aos 2 dias									
		2 dias	3 dias	6 dias	8 dias	10 dias	13 dias	16 dias	20 dias	24 dias	30 dias
100C	A	0,0	0,8	3,9	5,4	5,7	6,8	7,0	7,7	7,8	8,0
	B										
	C										
95C_5FCC	A	0,0	0,9	2,7	4,7	5,6	6,7	7,3	7,8	8,2	8,3
	B										
	C										
90C_10FCC	A	0,0	1,1	3,0	4,7	5,1	6,1	6,8	7,6	7,8	8,0
	B										
	C										
85C_15FCC	A	0,0	1,2	3,5	4,2	5,1	6,1	6,7	7,4	7,8	7,8
	B										
	C										

Anexo D.7 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus aumento de massa dia 3



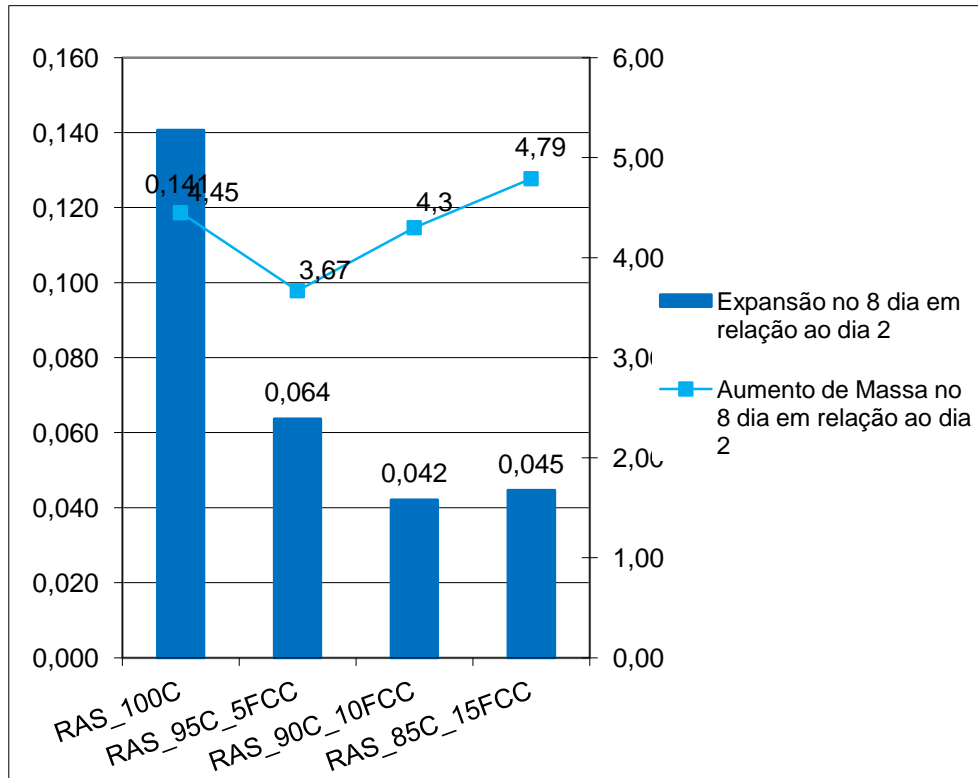
Argamassa	Expansão no 3 dia em relação ao dia 2	Aumento de Massa no 3 dia em relação ao dia 2
RAS_100C	0,016	0,85
RAS_95C_5FCC	0,003	0,87
RAS_90C_10FCC	0,012	1,13
RAS_85C_15FCC	0,006	1,17

Anexo D.8 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus aumento de massa dia 6



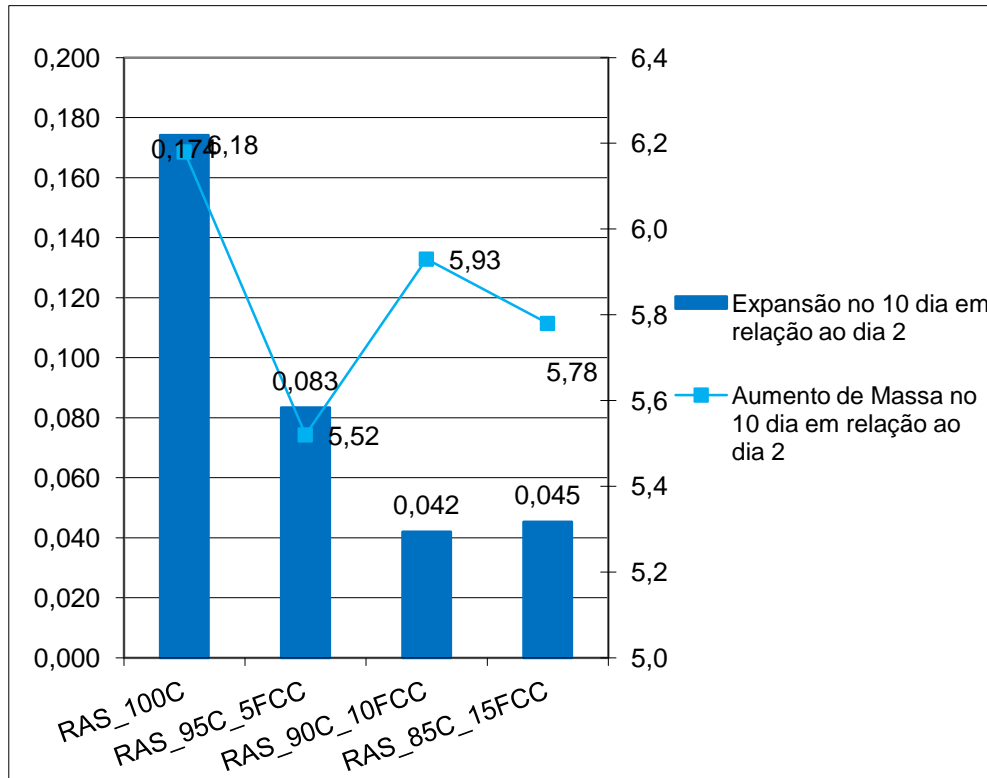
Argamassa	Expansão no 6 dia em relação ao dia 2	Aumento de Massa no 6 dia em relação ao dia 2
RAS_100C	0,080	1,33
RAS_95C_5FCC	0,036	1,77
RAS_90C_10FCC	0,017	2,28
RAS_85C_15FCC	0,050	2,53

Anexo D.9 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus aumento de massa dia 8



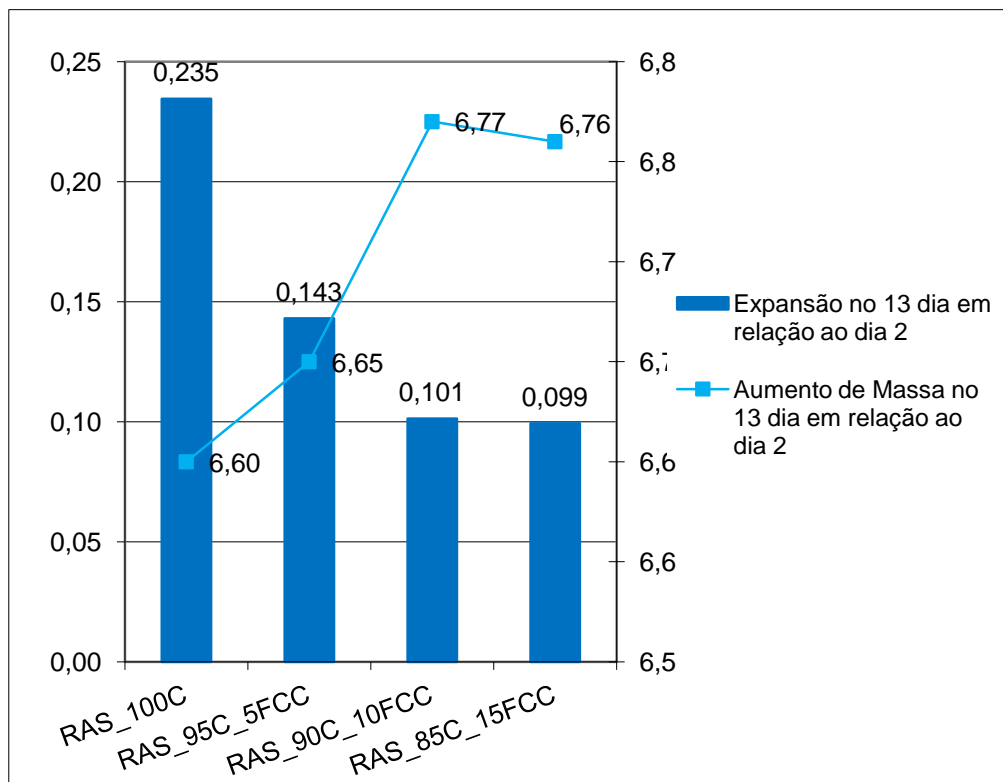
Argamassa	Expansão no 8 dia em relação ao dia 2	Aumento de Massa no 8 dia em relação ao dia 2
RAS_100C	0,141	4,45
RAS_95C_5FCC	0,064	3,67
RAS_90C_10FCC	0,042	4,3
RAS_85C_15FCC	0,045	4,79

Anexo D.10 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus aumento de massa dia 10



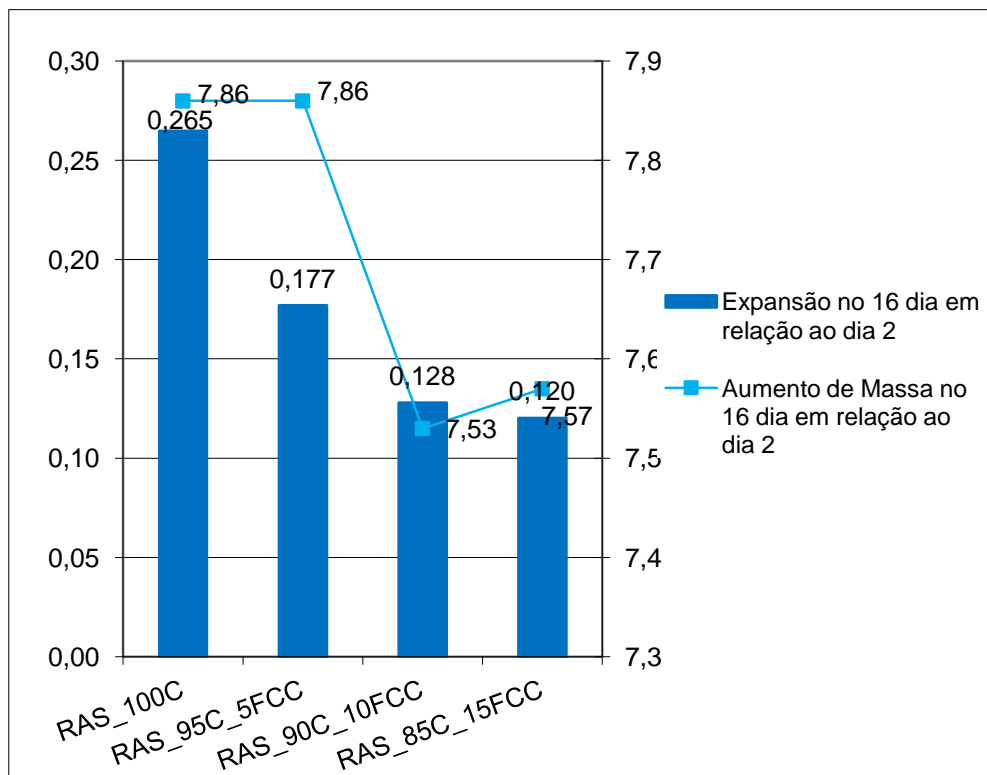
Argamassa	Expansão no 10 dia em relação ao dia 2	Aumento de Massa no 10 dia em relação ao dia 2
RAS_100C	0,174	6,18
RAS_95C_5FCC	0,083	5,52
RAS_90C_10FCC	0,042	5,93
RAS_85C_15FCC	0,045	5,78

Anexo D.11 – Reação Álcali-Sílica – Expansão versus aumento de massa dia 13



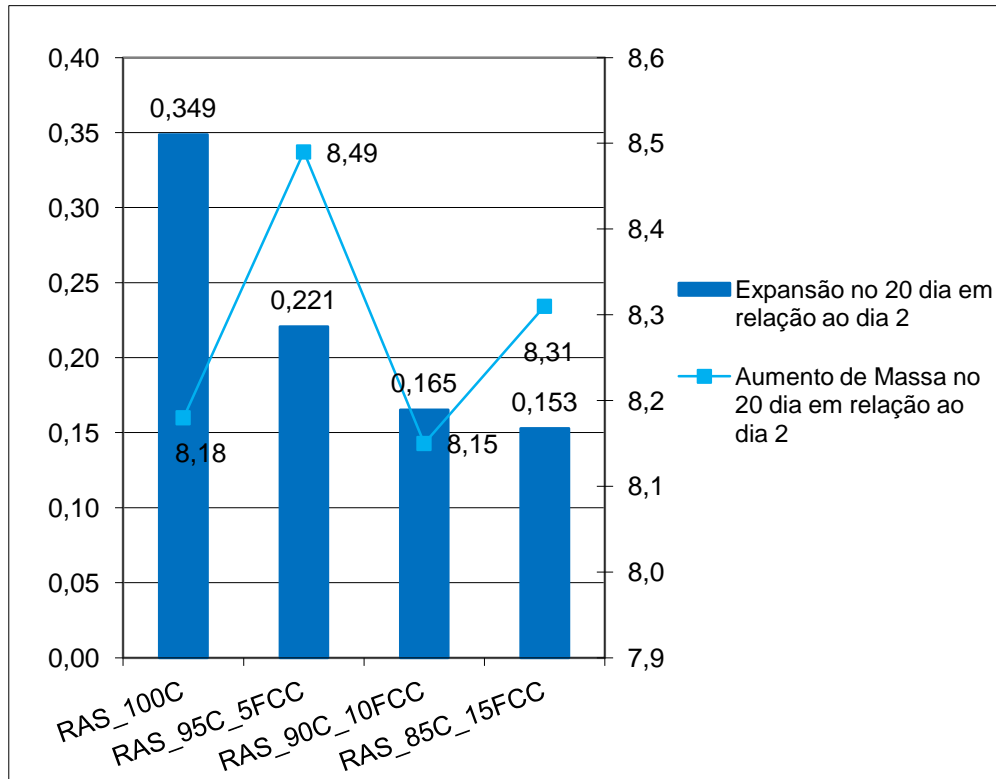
Argamassa	Expansão no 13 dia em relação ao dia 2	Aumento de Massa no 13 dia em relação ao dia 2
RAS_100C	0,235	6,60
RAS_95C_5FCC	0,143	6,65
RAS_90C_10FCC	0,101	6,77
RAS_85C_15FCC	0,099	6,76

Anexo D.12 – Reação Álcali-Sílica – Expansão versus aumento de massa dia 16



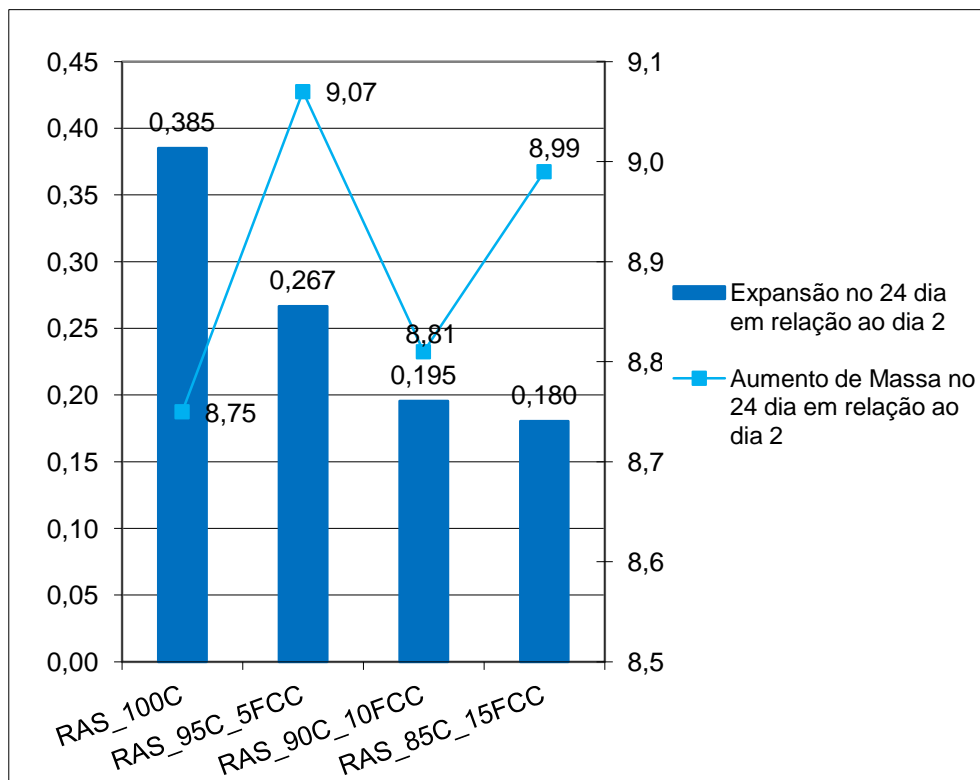
Argamassa	Expansão no 16 dia em relação ao dia 2	Aumento de Massa no 16 dia em relação ao dia 2
RAS_100C	0,265	7,86
RAS_95C_5FCC	0,177	7,86
RAS_90C_10FCC	0,128	7,53
RAS_85C_15FCC	0,120	7,57

Anexo D.13 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus aumento de massa dia 20



Argamassa	Expansão no 20 dia em relação ao dia 2	Aumento de Massa no 20 dia em relação ao dia 2
RAS_100C	0,349	8,18
RAS_95C_5FCC	0,221	8,49
RAS_90C_10FCC	0,165	8,15
RAS_85C_15FCC	0,153	8,31

Anexo D.14 – Reação Álcalis-Sílica – Expansão versus aumento de massa dia 24



Argamassa	Expansão no 24 dia em relação ao dia 2	Aumento de Massa no 24 dia em relação ao dia 2
RAS_100C	0,385	8,75
RAS_95C_5FCC	0,267	9,07
RAS_90C_10FCC	0,195	8,81
RAS_85C_15FCC	0,180	8,99

Anexos E – Resultados dos ensaios de resistência mecânica

E.1 – Resultados dos ensaios de resistência à flexão e compressão e o respetivo coeficiente de reprodutibilidade de cada argamassa

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo E.1 – Resultados dos ensaios de resistência à flexão e compressão e o respetivo coeficiente de reprodutibilidade de cada família de argamassa

Série de argamassa Durabilidade 95C_5FCC		2d	2d (Mpa)	7d	7d (Mpa)	28d A	28d A (Mpa)	Coef. Var. 28d A	28d B	28d B (Mpa)	Coef. Var. 28d B	56d	56d (Mpa)	90d	90d (Mpa)
Flexão	Provete A	2,81	6,60	3,38	7,93	3,57	8,36	1,79	3,47	8,12	1,02	3,35	7,86	3,18	7,46
	Provete B	2,83	6,63	3,43	8,04	3,10	7,27		2,80	6,56		3,01	7,05	3,12	7,32
	Provete C	2,69	6,30	3,16	7,41	3,41	8,00		3,26	7,65		3,24	7,60	3,53	8,26
	Média	2,78	6,51	3,33	7,79	3,36	7,88		3,18	7,44		3,20	7,50	9,83	7,68
Compressão	Provete A 1/2	68,22	42,64	96,98	60,61	111,79	69,87	1,79	112,40	70,25	1,02	109,59	68,49	113,73	71,08
	Provete A 2/2	70,57	44,11	95,99	59,99	109,40	68,38		111,10	69,44		110,35	68,97	111,32	69,58
	Provete B 1/2	68,00	42,50	97,24	60,78	110,21	68,88		111,85	69,91		110,15	68,84	112,32	70,20
	Provete B 2/2	67,99	42,49	93,95	58,72	109,44	68,40		109,69	68,56		109,31	68,32	112,81	70,51
	Provete C 1/2	68,42	42,76	92,47	57,79	108,37	67,73		110,70	69,19		110,34	68,96	113,75	71,09
	Provete C 2/2	63,39	39,62	91,80	57,38	105,96	66,23		109,61	68,51		112,36	70,23	112,12	70,08
	Média	67,77	42,35	94,74	59,21	109,20	68,25		110,89	69,31		110,35	68,97	112,68	70,49

Série de argamassa Durabilidade 100C		2d	2d (Mpa)	7d	7d (Mpa)	28d A	28d A (Mpa)	Coef. Var. 28d A	28d B	28d B (Mpa)	Coef. Var. 28d B	56d	56d (Mpa)	90d	90d (Mpa)
Flexão	Provete A	3,16	7,39	3,22	7,56	3,33	7,80	2,0	3,42	8,01	1,9	3,64	8,52	3,41	8,00
	Provete B	2,86	6,69	3,27	7,66	3,26	7,65		3,42	8,01		3,32	7,77	3,46	8,11
	Provete C	3,12	7,32	3,42	8,01	3,36	7,87		3,13	7,33		3,50	8,20	3,33	7,80
	Média	3,05	7,14	3,30	7,74	3,32	7,78		3,32	7,78		3,48	8,16	3,40	7,97
Compressão	Provete A 1/2	72,5	45,3	90,2	56,4	107,5	67,2	2,0	106,5	66,6	1,9	107,0	66,9	111,3	69,6
	Provete A 2/2	71,2	44,5	89,6	56,0	105,4	65,9		105,7	66,1		104,8	65,5	110,8	69,3
	Provete B 1/2	71,8	44,9	89,4	55,9	106,2	66,4		103,6	64,8		107,0	66,9	112,3	70,2
	Provete B 2/2	71,8	44,9	84,2	52,6	102,0	63,8		106,7	66,7		105,3	65,8	110,9	69,3
	Provete C 1/2	70,8	44,3	88,0	55,0	103,7	64,8		101,4	63,4		107,5	67,2	111,6	69,8
	Provete C 2/2	71,9	45,0	88,8	55,5	107,1	67,0		104,8	65,5		104,9	65,5	110,4	69,0
	Média	71,7	44,8	88,4	55,2	105,3	65,8		104,8	65,5		106,1	66,3	111,2	69,5

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Série de argamassa Durabilidade 90C_10FCC		2d	2d (Mpa)	7d	7d (Mpa)	28d A	28d A (Mpa)	Coef. Var. 28d A	28d B	28d B (Mpa)	Coef. Var. 28d B	56d	56d (Mpa)	90d	90d (Mpa)
Flexão	Provete A	2,43	5,69	3,050	7,15	3,09	7,24	1,2	3,24	7,60	2,6	3,46	8,10	3,40	7,97
	Provete B	2,48	5,81	2,992	7,01	3,09	7,24		3,25	7,62		3,54	8,29	3,20	7,50
	Provete C	2,49	5,84	3,216	7,54	3,20	7,50		3,30	7,74		3,31	7,75	3,08	7,22
	Média	2,47	5,78	3,09	7,23	3,13	7,33		3,26	7,65		3,43	8,05	3,23	7,56
Compressão	Provete A 1/2	63,5	39,7	86,9	54,3	111,14	69,5		110,14	68,8		112,1	70,0	114,5	71,6
	Provete A 2/2	64,1	40,1	87,8	54,9	110,71	69,2		111,65	69,8		110,7	69,2	114,4	71,5
	Provete B 1/2	61,2	38,2	91,7	57,3	111,34	69,6		110,57	69,1		109,2	68,2	114,3	71,4
	Provete B 2/2	61,8	38,6	87,3	54,6	108,89	68,1		110,33	69,0		109,2	68,2	113,4	70,9
	Provete C 1/2	61,4	38,4	88,8	55,5	108,67	67,9		115,01	71,9		111,0	69,4	114,3	71,4
	Provete C 2/2	61,1	38,2	90,8	56,7	111,12	69,5		105,91	66,2		110,3	69,0	114,6	71,6
	Média	62,2	38,9	88,9	55,6	110,3	68,9		110,6	69,1		110,4	69,0	114,2	71,4

Série de argamassa Durabilidade 85C_15FCC		2d	2d (Mpa)	7d	7d (Mpa)	28d A	28d A (Mpa)	Coef. Var. 28d A	28d B	28d B (Mpa)	Coef. Var. 28d B	56d	56d (Mpa)	90d	90d (Mpa)
Flexão	Provete A	2,24	5,24	2,96	6,94	3,09	7,23	1,5	3,27	7,65	0,8	3,24	7,60	3,12	7,31
	Provete B	2,04	4,78	2,91	6,82	2,99	7,01		3,06	7,18		3,10	7,27	3,21	7,52
	Provete C	1,98	4,65	2,85	6,69	2,90	6,79		2,99	7,01		3,17	7,43	3,23	7,56
	Média	2,09	4,89	2,91	6,82	2,99	7,01		3,11	7,28		3,17	7,43	3,18	7,46
Compressão	Provete A 1/2	52,7	32,9	87,1	54,5	108,0	67,5		107,0	66,9		108,9	68,1	112,2	70,1
	Provete A 2/2	52,6	32,9	85,5	53,4	104,8	65,5		106,8	66,8		107,6	67,2	110,4	69,0
	Provete B 1/2	52,3	32,7	86,0	53,7	105,7	66,1		105,9	66,2		108,4	67,7	110,8	69,3
	Provete B 2/2	50,2	31,4	86,8	54,3	107,9	67,4		107,5	67,2		108,7	67,9	110,7	69,2
	Provete C 1/2	48,5	30,3	85,5	53,5	104,7	65,5		105,1	65,7		107,7	67,3	110,3	68,9
	Provete C 2/2	56,4	35,3	86,9	54,3	104,7	65,4		106,0	66,2		107,9	67,4	109,8	68,6
	Média	52,1	32,6	86,3	53,9	106,0	66,2		106,4	66,5		108,7	67,6	110,7	69,2

Anexos F – Resultados dos ensaios de absorção capilar

F.1 – Absorção Capilar registo da massa (g) adquirida para cada provete de cada argamassa

F.2 – Absorção Capilar aumento de massa (g) adquirida para cada provete de cada argamassa

F.3 – Absorção Capilar captação de água (i) determinada para cada provete de cada argamassa

F.4 – Absorção Capilar média da Captação de água determinada de cada argamassa

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo F.1 – Absorção capilar registo da massa (g) adquirida para cada provete de cada argamassa

Ganho de Massa	Provetes	Leitura (g)							
		"-2 horas"	0 minutos	12 minutos	30 minutos	1 hora	2 horas	4 horas	24 horas
100C	A	477,88	476,78	477,15	477,58	478,35	479,13	480,95	487,36
	B	479,86	479,36	482,33	483,17	484,30	485,34	487,20	494,73
	C	499,34	498,64	501,22	501,96	503,11	504,18	505,96	513,04
95C_5FCC	A	468,35	467,95	469,32	469,75	470,86	471,16	472,49	478,63
	B	474,56	474,13	475,05	475,86	476,97	477,55	478,72	484,29
	C	460,07	459,86	460,69	461,34	462,26	462,85	464,02	469,57
90C_10FCC	A	455,98	455,92	457,16	457,79	458,51	459,51	460,94	466,66
	B	443,18	443,11	443,75	443,90	444,25	444,68	445,36	449,15
	C	470,22	470,01	471,01	471,27	471,70	472,08	472,85	476,49
85C_15FCC	A	439,87	438,77	439,3	439,67	440,2	440,81	441,69	445,60
	B	464,78	464,28	464,53	464,72	464,93	465,18	465,69	467,61
	C	482,58	481,88	483,27	484,12	484,86	485,62	486,72	488,1

Anexo F.2 – Absorção capilar aumento de massa (g) adquirida para cada provete de cada argamassa

Ganho de Massa	Provetes	Ganho de Massa (g)						
		0 minutos	12 minutos	30 minutos	1 horas	2 horas	4 horas	24 horas
100C	A	0	0,37	0,8	1,57	2,35	4,17	10,58
	B	0	2,97	3,81	4,94	5,98	7,84	15,37
	C	0	2,58	3,32	4,47	5,54	7,32	14,4
95C_5FCC	A	0	1,37	1,8	2,91	3,21	4,54	10,68
	B	0	0,92	1,73	2,84	3,42	4,59	10,16
	C	0	0,83	1,48	2,4	2,99	4,16	9,71
90C_10FCC	A	0	1,24	1,87	2,59	3,59	5,02	10,74
	B	0	0,64	0,79	1,14	1,57	2,25	6,04
	C	0	1	1,26	1,69	2,07	2,84	6,48
85C_15FCC	A	0	0,53	0,9	1,43	2,04	2,92	6,83
	B	0	0,25	0,44	0,65	0,9	1,41	3,33
	C	0	1,39	2,24	2,98	3,74	4,84	6,22

Anexo F.3 – Absorção capilar captação de água (i) determinada para cada provete de cada argamassa

Ganho de Massa	Provetes	Captação de água (i)						
		0	0,2	0,5	1	2	4	24
100C	A	0	0,05	0,10	0,20	0,30	0,53	1,35
	B	0	0,38	0,49	0,63	0,76	1,00	1,96
	C	0	0,33	0,42	0,57	0,71	0,93	1,83
95C_5FCC	A	0	0,17	0,23	0,37	0,41	0,58	1,36
	B	0	0,12	0,22	0,36	0,44	0,58	1,29
	C	0	0,11	0,19	0,31	0,38	0,53	1,24
90C_10FCC	A	0	0,16	0,24	0,33	0,46	0,64	1,37
	B	0	0,08	0,10	0,15	0,20	0,29	0,77
	C	0	0,13	0,16	0,22	0,26	0,36	0,83
85C_15FCC	A	0	0,07	0,11	0,18	0,26	0,37	0,87
	B	0	0,03	0,06	0,08	0,11	0,18	0,42
	C	0	0,18	0,29	0,38	0,48	0,62	0,79

Anexo F.4 – Absorção capilar média da captação de água determinada de cada argamassa

Ganho de Massa	Provetes	Captação de Água Média (kg/m ²)						
		0	0,2	0,5	1	2	4	24
100C	A	0,00	0,25	0,34	0,47	0,59	0,82	1,71
	B							
	C							
95C_5FCC	A	0,00	0,13	0,21	0,35	0,41	0,56	1,30
	B							
	C							
90C_10FCC	A	0,00	0,12	0,17	0,23	0,31	0,43	0,99
	B							
	C							
85C_15FCC	A	0,00	0,09	0,15	0,21	0,28	0,39	0,70
	B							
	C							

Anexos G – Resultados dos ensaios do módulo de elasticidade

G.1 – Resultados dos ensaios do Módulo de Elasticidade de cada família de argamassa

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo G.1 – Resultados dos ensaios do módulo de elasticidade de cada família de argamassa

100C	Inicial	Final
Força de Ensaio (kN)	9	28
Tensão (MPa)	5,6	17,5
Base de Medida (mm)	50	-

Série de argamassa Durabilidade										
100C	Provete	Ciclo	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Deformações				$\Delta\varepsilon$	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Média
				lb		la				
100C	A	4	11,9	3032	1517	2876	1347	326	36,4	36,3
				2274,5		2111,5				
		5	11,9	3031	1517	2876	1347	325	36,5	
				2274		2111,5				
		6	11,9	3031	1515	2875	1345	326	36,4	
				2273		2110				
	B	4	11,9	1832	-1112	1668	-1283	335	35,4	
				360		192,5				
		5	11,9	1830	-1116	1669	-1285	330	36,0	
				357		192				
		6	11,9	1829	-1116	1667	-1284	330	36,0	
				356,5		191,5				
C	4	11,9	4772	-1422	4613	-1585	322	36,9		
			1675		1514					
	5	11,9	4771	-1422	4612	-1585	322	36,9		
			1674,5		1513,5					
	6	11,9	4769	-1423	4609	-1588	325	36,5		
			1673		1510,5					

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

95C_5FCC		
	Inicial	Final
Força de Ensaio (kN)	9	23
Tensão (MPa)	5,6	14,4
Base de Medida (mm)	50	-

Série de argamassa Durabilidade										
95C_5FCC	Provete	Ciclo	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Deformações				$\Delta\varepsilon$	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Média
				lb		la				
95C_5FCC	A	4	8,8	4362	-1770	4239	-1882	235	37,2	36,9
				1296		1178,5				
		5	8,8	4360	-1771	4235	-1882	236	37,1	
				1294,5		1176,5				
		6	8,8	4358	-1772	4234	-1883	235	37,2	
				1293		1175,5				
	B	4	8,8	877	-2010	759	-2132	240	36,5	
				-566,5		-686,5				
		5	8,8	877	-2010	759	-2132	240	36,5	
				-566,5		-686,5				
		6	8,8	877	-2011	759	-2133	240	36,5	
				-567		-687				
C	4	8,8	4362	-1770	4239	-1882	235	37,2		
			1296		1178,5					
	5	8,8	4360	-1771	4235	-1882	236	37,1		
			1294,5		1176,5					
	6	8,8	4358	-1772	4234	-1883	235	37,2		
			1293		1175,5					

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

90C_10FCC		
	Inicial	Final
Força de Ensaio (kN)	9	23
Tensão (MPa)	5,6	14,4
Base de Medida (mm)	50	-

Série de argamassa Durabilidade										
90C_10FCC	Provete	Ciclo	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Deformações				$\Delta\epsilon$	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Média
				Ib		Ia				
90C_10FCC	A	4	8,8	3096	-1535	2976	-1656	241	36,3	35,9
				780,5		660				
		5	8,8	3098	-1534	2979	-1660	245	35,7	
				782		659,5				
		6	8,8	3101	-1535	2981	-1656	241	36,3	
				783		662,5				
	B	4	8,8	4293	3296	4165	3179	245	35,7	
				3794,5		3672				
		5	8,8	4293	3295	4165	3180	243	36,0	
				3794		3672,5				
		6	8,8	4292	3296	4167	3181	240	36,5	
				3794		3674				
C	4	8,8	3597	1148	3469	1027	249	35,1		
			2372,5		2248					
	5	8,8	3595	1147	3470	1029	243	36,0		
			2371		2249,5					
	6	8,8	3596	1148	3469	1027	248	35,3		
			2372		2248					

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

85C_15FCC		
	Inicial	Final
Força de Ensaio (kN)	9	22
Tensão (MPa)	5,6	13,8
Base de Medida (mm)	50	-

Série de argamassa Durabilidade										
85C_15FCC	Provete	Ciclo	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Deformações				$\Delta\varepsilon$	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Média
				Ib		Ia				
85C_15FCC	A	4	8,1	2301	-559	2181	-684	245	33,2	34,1
				871		748,5				
		5	8,1	2299	-559	2180	-684	244	33,3	
				870		748				
		6	8,1	2301	-559	2181	-683	244	33,3	
				871		749				
	B	4	8,1	2122	2726	2003	2610	235	34,6	
				2424		2306,5				
		5	8,1	2120	2726	2000	2607	239	34,0	
				2423		2303,5				
		6	8,1	2119	2726	1999	2607	239	34,0	
				2422,5		2303				
C	4	8,1	2159	-2689	2008	-2772	234	34,7		
			-265		-382					
	5	8,1	2160	-2689	2009	-2772	234	34,7		
			-264,5		-381,5					
	6	8,1	2162	-2689	2010	-2770	233	34,9		
			-263,5		-380					

Anexo H – Resultados dos ensaios da difusão de cloretos em regime não estacionário

H.1 – Difusão de Cloretos em regime não estacionário (CTH), de cada família de argamassa

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo H.1 – Difusão de cloretos em regime não estacionário (CTH), de cada família de argamassa

Série de argamassa Durabilidade 100C										
Provete	Dimensões do Provete (mm)		Intensidade da corrente (mA)		Temperatura da solução (°C)			U Tensão aplicada (v)	Duração do ensaio (horas)	
	Diâmetro	Altura	I (inicial)	I (final)	T (inicial)	T (final)	T (média)			
A	100	50	45	36	19,8	19,4	19,6	10	24	
B	100	50	44,9	36,8	19,8	19,4	19,6	10	24	
C	100	50	42,6	35,5	19,8	19,6	19,7	10	24	
Série de argamassa Durabilidade 100C										
Provete	Profundidade de Penetração de cloretos (mm)							Prof. Penetração média (mm)	Coef. De difusão(m ² /s)	Coef. De Difusão Médio
	D4	D3	D	D1	D2	D3	D2			
A	8,0	8,5	7,5	10,0	9,0	8,5	8,0	8,5	10,08	10,62
B	9,5	8,5	9,0	10,0	9,0	9,0	8,0	9,0	10,83	
C	8,5	9,5	9,5	9,0	9,5	9,5	8,0	9,1	10,94	

Série de argamassa Durabilidade 95C_5FCC										
Provete	Dimensões do Provete (mm)		Intensidade da corrente (mA)		Temperatura da solução (°C)			U Tensão aplicada (v)	Duração do ensaio (horas)	
	Diâmetro	Altura	I (inicial)	I (final)	T (inicial)	T (final)	T (média)			
A	100	50	46	37,6	19,8	19,8	19,8	10	24	
B	100	50	43,1	36,1	19,8	19,8	19,8	10	24	
C	100	50	40,7	35,1	19,8	19,8	19,8	10	24	
Série de argamassa Durabilidade 95C_5FCC										
Provete	Profundidade de Penetração de cloretos (mm)							Prof. Penetração média (mm)	Coef. De difusão(m ² /s)	Coef. De Difusão Médio
	D4	D3	D	D1	D2	D3	D2			
A	7,5	8,5	8,5	8,0	8,0	8,0	8,0	8,1	9,44	9,83
B	9,0	9,0	9,0	10,0	9,0	7,0	8,0	8,7	10,40	
C	7,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,0	8,0	8,2	9,65	

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Série de argamassa Durabilidade 90C_10FCC									
Provete	Dimensões do Provete (mm)		Intensidade da corrente (mA)		Temperatura da solução (°C)			U Tensão aplicada (v)	Duração do ensaio (horas)
	Diâmetro	Altura	I (inicial)	I (final)	T (inicial)	T (final)	T (média)		
A	100	50	31,8	31,1	19,8	19,4	19,6	10	24
B	100	50	31,6	30,9	19,8	19,2	19,5	10	24
C	100	50	29,3	28,3	19,8	19,2	19,5	10	24

Série de argamassa Durabilidade 90C_10FCC										
Provete	Profundidade de Penetração de cloretos (mm)							Prof. Penetração média (mm)	Coef. De difusão(m2/s)	Coef. De Difusão Médio
	D4	D3	D	D1	D2	D3	D2			
A	7,0	8,0	9,0	9,0	7,0	8,0	7,0	7,9	9,11	9,43
B	8,0	7,0	7,0	11,0	8,0	7,5	8,0	8,1	9,43	
C	11,0	7,0	7,0	7,0	8,0	9,0	9,0	8,3	9,75	

Série de argamassa Durabilidade 85C_15FCC									
Provete	Dimensões do Provete (mm)		Intensidade da corrente (mA)		Temperatura da solução (°C)			U Tensão aplicada (v)	Duração do ensaio (horas)
	Diâmetro	Altura	I (inicial)	I (final)	T (inicial)	T (final)	T (média)		
A	100	50	35,5	31,3	19	18,8	18,9	10	24
B	100	50	35,4	30,6	19	19	19	10	24
C	100	50	33,2	30	19	19	19	10	24

Série de argamassa Durabilidade 85C_15FCC										
Provete	Profundidade de Penetração de cloretos (mm)							Prof. Penetração média (mm)	Coef. De difusão(m2/s)	Coef. De Difusão Médio
	D4	D3	D	D1	D2	D3	D2			
A	7,1	7,5	7,5	8,5	8,3	7,5	7,5	7,7	8,14	8,18
B	7,5	9,0	8,0	8,0	7,8	7,5	7,5	7,9	8,50	
C	7,0	9,0	8,0	8,0	7,0	7,0	7,0	7,6	7,92	

Anexos I – Resultados dos ensaios de resistência a carbonatação acelerada

I.1 – Profundidade de carbonatação nas diferentes faces dos provetes de cada argamassa

I.2 – Média de profundidade de carbonatação de cada argamassa

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo I.1 – Profundidade de carbonatação nas diferentes faces dos provetes de cada argamassa

Idade	Série de argamassas Durabilidade 100C											
	Profundidade de Carbonatação (mm) nas diferentes Faces dos diferentes Provetes - Submetidas a 5% de CO2											
	Provete A				Provete B				Provete C			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
42 dias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 dias	3,87	3,77	3,01	1,73	2,07	3,7	3,6	2,32	2,98	2,46	2,66	4,28
	3,8	1,99	2,93	3,52	2,07	2,1	2,7	4,02	2,37	1,86	3,68	4,28
	2,22	2,8	3,46	1,6	2,04	2,59	3,17	3,17	2,14	1,67	2,57	3,72
70 dias	2,12	3,07	4,37	2,89	4,27	3,16	4,96	4,01	3,29	5,12	4,9	3,15
	2,12	3,75	3,77	4,92	3,33	4,05	5,46	4,48	2,51	4,41	4,91	3,15
	2,42	4,88	4,29	2,89	2,79	4	4,02	5,4	2,75	3,07	5,09	2,87
98 dias	4,19	5,26	3,9	2,74	5,48	4,47	2,76	2,76	4,40	4,3	3,58	3,33
	5,53	4,73	5,00	2,78	5,44	6,06	4,74	3,22	4,40	5,02	4,05	3,33
	4,96	5,81	5,45	2,78	5,43	6,06	3,88	3,78	4,40	3,61	3,11	3,33
116 dias	4,77	5,28	5,60	2,85	5,89	5,82	4,31	2,92	5,62	5,32	4,33	4,20
	6,54	6,09	5,82	3,17	5,76	6,80	5,88	3,76	5,62	7,59	4,82	4,12
	5,92	7,15	4,49	3,92	5,95	6,95	4,71	3,98	5,62	5,68	5,40	4,12
133 dias	4,97	6,42	6,27	3,72	6,30	6,52	4,76	3,83	5,83	5,91	5,15	4,70
	6,97	6,42	6,30	3,72	6,50	7,39	6,45	3,83	5,83	7,93	5,75	4,93
	6,5	7,66	4,99	4,42	6,99	7,46	6,76	4,48	6,97	6,77	5,94	4,93

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Idade	Série de argamassas Durabilidade 95C_5FCC											
	Profundidade de Carbonatação (mm) nas diferentes Faces dos diferentes Provetes - Submetidas a 5% de CO2											
	Provete A				Provete B				Provete C			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
42 dias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 dias	2,84	4,55	3,88	2,69	2,67	4,13	4,27	3,92	2,7	2,73	4,56	4,62
	2,85	5	2,85	1,99	2,27	3,2	3,44	2,23	2,12	4,69	3,69	3,63
	4,52	4,11	2,46	2,33	3,67	3,94	2,87	1,99	2,57	3,42	4,05	3,33
70 dias	3,11	4,74	5,34	3,37	2,99	4,32	4,74	3,40	2,65	5,37	5,92	3,01
	4,11	3,7	6,19	4,03	2,73	4,1	4,87	4,50	2,28	3,43	4,57	5,05
	4,82	2,99	5,65	3,36	3,11	4,16	5,65	4,48	2,95	4,58	4,17	2,02
98 dias	3,41	7,69	5,17	3,42	5,49	6,15	3,99	3,74	4,78	8,22	7,42	3,20
	6,35	5,36	5,79	4,31	6,33	8,52	8,37	4,43	5,5	7,07	5,33	4,06
	6,56	7,44	5,00	4,20	6,24	6,18	6,44	3,78	5,9	5,75	4,21	4,12
116 dias	4,56	8,45	7,87	3,83	5,94	7,00	5,15	4,40	5,49	9,02	8,12	4,40
	7,14	7,32	6,52	4,89	7,12	8,65	9,05	4,98	6,16	7,70	6,04	4,68
	7,24	7,74	6,04	4,8	7,03	7,50	7,56	4,26	6,16	7,93	5,70	4,46
133 dias	6,53	8,55	8,45	4,55	6,59	9,19	6,69	5,32	5,94	9,68	8,83	5,55
	7,56	8,55	7,13	5,43	7,89	9,19	9,56	5,67	6,52	8,41	6,70	5,86
	7,89	8,42	7,13	5,43	7,78	9,20	8,32	4,87	6,52	8,68	6,70	5,55

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Idade	Série de argamassa Durabilidade 90C_10FCC											
	Profundidade de Carbonatação (mm) nas diferentes Faces dos diferentes Provetes - Submetidas a 5% de CO2											
	Provete A				Provete B				Provete C			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
42 dias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 dias	3,95	4,76	4,79	3,79	3,58	5,64	4,93	3,73	3,31	2,96	5,39	3,24
	2,97	3,75	5,2	3,01	3,08	6,88	4,03	2,79	2,72	4,47	4,54	3,23
	3,12	4,58	4,21	4,58	3,64	4,56	3,24	3,96	2,7	3,65	5,59	4,35
70 dias	3,31	3,70	4,50	4,76	3,65	4,27	6,25	4,37	3,34	4,53	5,11	4,78
	2,35	4,10	6,00	5,39	2,97	3,44	6,2	5,07	3,35	5,11	8,7	5,53
	3,25	5,33	4,69	5,61	3,05	4,9	5,28	3,8	3,36	6,78	6,24	5,16
98 dias	4,96	9,39	8,33	4,48	5,6	7,94	6,99	3,15	6,62	7,97	6,86	4,13
	6,21	8,62	7,46	6,18	7,09	7,35	5,85	4,56	6,14	8,59	6,86	4,12
	7,30	8,46	7,26	4,89	7,6	8,18	5,20	4,78	6,99	8,02	8,02	5,10
116 dias	8,19	9,95	9,14	4,93	8,02	9,19	9,25	5,51	9,42	9,12	8,31	5,46
	8,85	10,79	8,27	6,39	6,96	8,88	9,00	6,43	8,46	9,16	8,31	6,12
	9,95	9,51	8,27	5,01	9,23	9,25	6,56	6,08	8,14	9,16	7,36	6,82
133 dias	9,02	11,00	10,06	6,14	8,94	10,65	10,23	6,67	10,26	10,58	9,16	6,55
	9,50	11,47	9,36	7,22	7,77	9,29	9,87	7,44	9,39	10,49	9,21	7,09
	10,10	10,67	9,36	6,08	10,29	10,57	7,67	7,44	9,13	10,31	8,54	7,88

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Idade	Série de argamassa Durabilidade 85C_15FCC											
	Profundidade de Carbonatação nas diferentes Faces dos diferentes Provetes - Submetidas a 5% de CO2											
	Provete A				Provete B				Provete C			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
42 dias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 dias	3,85	5,25	5,23	3,73	2,67	2,98	5,96	5,81	2,20	3,66	4,77	4,55
	5	4,31	4,15	3,3	2,32	4,68	5,08	4,88	3,24	3,46	4,37	4,75
	6,66	5,38	4,4	2,32	2,31	5,68	4,34	3,35	4,27	5,85	5,53	3,3
70 dias	4,19	5,86	4,82	4,8	3,46	4,88	6,45	4,48	4,2	5,69	5,88	5,54
	4,19	5,86	6,52	5,28	3,09	4,27	5,41	3,46	4,5	6,11	6,29	7,39
	4,76	8,00	5,63	5,06	4,40	5,82	4,67	4,62	3,22	5,68	5,37	5,8
98 dias	8,56	8,53	8,18	5,84	7,50	8,08	8,68	6,26	8,03	10,77	9,12	5,38
	8,13	9,04	8,26	6,69	8,83	8,09	6,91	6,46	9,57	8,1	10,33	6,99
	9,82	9,96	9,58	6,44	10,67	8,96	6,58	5,59	8,72	7,47	6,67	5,99
116 dias	9,69	11,46	8,98	6,93	8,98	13,15	9,82	7,40	10,48	11,33	10,11	6,60
	10,3	12,78	9,00	7,69	9,81	11,80	8,25	7,83	10,47	9,89	11,15	7,40
	11,56	13,22	10,88	7,40	10,94	11,53	8,44	6,90	10,44	9,38	9,10	6,24
133 dias	10,52	12,10	9,45	8,14	9,81	14,34	10,94	8,20	11,65	12,16	11,12	7,86
	11,04	13,87	10,26	8,40	10,89	12,98	9,46	8,16	11,74	11,87	12,29	7,99
	12,25	14,31	11,54	9,20	11,54	12,78	9,59	7,59	11,47	11,09	10,45	7,45

Anexo I.2 – Média de profundidade de carbonatação de cada argamassa

Idade	Série de argamassas Durabilidade 100C															
	Profundidade de Carbonatação (mm) nas diferentes Faces dos diferentes Provetes - Submetidas a 5% de CO2												Média de Profundidade de Penetraçã			Média total
	Provete A				Provete B				Provete C				A	B	C	
	dk1	dk2	dk3	dk4	dk1	dk2	dk3	dk4	dk1	dk2	dk3	dk4				
42 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60 dias	3,30	2,85	3,13	2,28	2,06	2,80	3,16	3,17	2,50	2,00	2,97	4,09	2,89	2,80	2,89	2,86
70 dias	2,56	3,90	4,14	3,57	3,46	3,74	4,81	4,63	2,85	4,20	4,97	3,06	3,54	4,16	3,77	3,82
98 dias	4,89	5,27	4,78	2,77	5,45	5,53	3,79	3,25	4,40	4,31	3,58	3,33	4,43	4,51	3,91	4,28
116 dias	5,74	6,17	5,30	3,31	5,87	6,52	4,97	3,55	5,62	6,20	4,85	4,15	5,13	5,23	5,20	5,19
133 dias	6,15	6,83	5,85	3,95	6,60	7,12	5,99	4,05	6,21	6,87	5,61	4,85	5,70	5,94	5,89	5,84

Idade	Série de argamassas Durabilidade 95C_5FCC															
	Profundidade de Carbonatação (mm) nas diferentes Faces dos diferentes Provetes - Submetidas a 5% de CO2												Média de Profundidade de Penetraçã			Média total
	Provete A				Provete B				Provete C				A	B	C	
	dk1	dk2	dk3	dk4	dk1	dk2	dk3	dk4	dk1	dk2	dk3	dk4				
42 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60 dias	3,40	4,55	3,06	2,34	2,87	3,76	3,53	2,71	2,46	3,61	4,10	3,86	3,34	3,22	3,51	3,36
70 dias	4,01	3,81	5,73	3,59	2,94	4,19	5,09	3,30	2,63	4,46	4,89	3,36	4,28	3,88	3,83	4,00
98 dias	5,44	6,83	5,32	3,98	6,02	6,95	6,27	3,98	5,39	7,01	5,65	3,79	5,39	5,80	5,46	5,55
116 dias	6,31	7,84	6,81	4,51	6,70	7,72	7,25	4,55	5,94	8,22	6,62	4,51	6,37	6,55	6,32	6,41
133 dias	7,33	8,51	7,57	5,14	7,42	9,19	8,19	5,29	6,33	8,92	7,41	5,65	7,14	7,52	7,08	7,25

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Idade	Série de argamassa Durabilidade 90C_10FCC															
	Profundidade de Carbonatação (mm) nas diferentes Faces dos diferentes Provetes - Submetidas a 5% de CO2												Média de Profundidade de Penetração			Média total
	Provete A				Provete B				Provete C				A	B	C	
	dk1	dk2	dk3	dk4	dk1	dk2	dk3	dk4	dk1	dk2	dk3	dk4				
42 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60 dias	3,35	4,36	4,73	3,79	3,43	5,69	4,07	3,49	2,91	3,69	5,17	3,61	4,06	4,17	3,85	4,03
70 dias	2,97	4,38	5,06	5,25	3,22	4,20	5,91	4,47	3,35	5,47	6,68	5,16	4,42	4,45	5,17	4,68
98 dias	6,16	8,82	7,68	5,18	6,76	7,82	6,01	4,16	6,58	8,19	7,25	4,45	6,96	6,19	6,62	6,59
116 dias	9,00	10,08	8,56	5,44	8,07	9,11	8,27	6,01	8,67	9,15	7,99	6,13	8,27	7,86	7,99	8,04
133 dias	9,54	11,05	9,59	6,48	9,00	10,17	9,26	7,18	9,59	10,46	8,97	7,17	9,17	8,90	9,05	9,04

Idade	Série de argamassa Durabilidade 85C_15FCC															
	Profundidade de Carbonatação (mm) nas diferentes Faces dos diferentes Provetes - Submetidas a 5% de CO2												Média de Profundidade de Penetração			Média total
	Provete A				Provete B				Provete C				A	B	C	
	dk1	dk2	dk3	dk4	dk1	dk2	dk3	dk4	dk1	dk2	dk3	dk4				
42 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60 dias	5,17	4,98	4,59	3,12	2,43	4,45	5,13	4,68	3,24	4,32	4,89	4,20	4,47	4,17	4,16	4,27
70 dias	4,38	6,57	5,66	5,05	3,65	4,99	5,51	3,76	3,97	5,83	5,85	6,24	5,41	4,48	5,47	5,12
98 dias	8,84	9,18	8,67	6,32	9,00	8,38	7,39	6,10	8,77	8,78	8,71	6,12	8,25	7,72	8,10	8,02
116 dias	10,52	12,49	9,62	7,34	9,91	12,16	8,84	7,38	10,46	10,20	10,12	6,75	9,99	9,57	9,38	9,65
133 dias	11,27	13,43	10,42	8,58	10,75	13,37	10,00	7,98	11,62	11,71	11,29	7,77	10,92	10,52	10,60	10,68

Anexos J – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao oxigénio

J.1 – Permeabilidade ao oxigénio de cada argamassa

J.2 – Permeabilidade ao oxigénio – desvio dos resultados da linearidade

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Anexo J.1 – Permeabilidade ao oxigénio de cada argamassa

Identificação do provete	Equipamento utilizada	Pressão manométrica (bar)	Tubo				Tempo (s)	Volume de cada tubo	Qi (m ³ /s)	Qi média (m ³ /s)	Pressão Atm (N/m ²)	Pressão Abs. (N/m ²)	Permeabilidade Oxigénio (m ²)	Permeabilidade Oxigénio Média K _{oxig} (m ²)
			1	2	3	4								
Série de argamassa Durabilidade 100C A	Equipamento Antigo	1,5	X				109,03	0,0000015	1,37577E-08	100600	250600	2,96252E-18	2,59E-18	
	Equipamento Antigo	1,5	X				111,45	0,0000015	1,3459E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				58,85	0,0000015	2,54885E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				60,4	0,0000015	2,48344E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				38,86	0,0000015	3,86001E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				39,95	0,0000015	3,75469E-08					
Identificação do provete	Equipamento utilizada	Pressão manométrica (bar)	Tubo				Tempo (s)	Volume de cada tubo	Qi (m ³ /s)	Qi média (m ³ /s)	Pressão Atm (N/m ²)	Pressão Abs. (N/m ²)	Permeabilidade Oxigénio (m ²)	Permeabilidade Oxigénio Média K _{oxig} (m ²)
Série de argamassa Durabilidade 100C B	Equipamento Antigo	1,5	X				132,09	0,0000015	1,13559E-08	100600	250600	2,45592E-18	2,10E-18	
	Equipamento Antigo	1,5	X				133,85	0,0000015	1,12066E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				72,24	0,0000015	2,07641E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				74,2	0,0000015	2,02156E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				50,17	0,0000015	2,98983E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				50,75	0,0000015	2,95567E-08					
Identificação do provete	Equipamento utilizada	Pressão manométrica (bar)	Tubo				Tempo (s)	Volume de cada tubo	Qi (m ³ /s)	Qi média (m ³ /s)	Pressão Atm (N/m ²)	Pressão Abs. (N/m ²)	Permeabilidade Oxigénio (m ²)	Permeabilidade Oxigénio Média K _{oxig} (m ²)
Série de argamassa Durabilidade 100C C	Equipamento Antigo	1,5	X				133,67	0,0000015	1,12217E-08	100600	250600	2,41222E-18	2,01E-18	
	Equipamento Antigo	1,5	X				137,12	0,0000015	1,09393E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				80,65	0,0000015	1,85989E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				80,54	0,0000015	1,86243E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				51,63	0,0000015	2,90529E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				51,77	0,0000015	2,89743E-08					
												Média total Ki	2,24E-18	

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Identificação do provete	Equipamento utilizada	Pressão manométrica (bar)	Tubo				Tempo	Volume de cada tubo	Qi (m ³ /s)	Qi média (m ³ /s)	Pressão Atm (N/m ²)	Pressão Abs. (N/m ²)	Permeabilidade Oxigénio (m ²)	Permeabilidade Oxigénio Média K _{oxig} (m ²)
			1	2	3	4								
Série de argamassa Durabilidade 95C_5FCC	Equipamento Ant	1,5	X				92,03	0,0000015	1,6299E-08	1,64588E-08	100600	250600	3,58308E-18	3,71E-18
	Equipamento Ant	1,5	X				90,26	0,0000015	1,66187E-08					
	Equipamento Ant	2,5	X				38,09	0,0000015	3,93804E-08	3,862E-08		350600	3,92651E-18	
	Equipamento Ant	2,5	X				39,62	0,0000015	3,78597E-08					
	Equipamento Ant	3,5	X				24,24	0,0000015	6,18812E-08	6,10007E-08		450600	3,62627E-18	
	Equipamento Ant	3,5	X				24,95	0,0000015	6,01202E-08					
Identificação do provete	Equipamento utilizada	Pressão manométrica (bar)	Tubo				Tempo	Volume de cada tubo	Qi (m ³ /s)	Qi média (m ³ /s)	Pressão Atm (N/m ²)	Pressão Abs. (N/m ²)	Permeabilidade Oxigénio (m ²)	Permeabilidade Oxigénio Média K _{oxig} (m ²)
Série de argamassa Durabilidade 95C_5FCC	Equipamento Ant	1,5	X				140,73	0,0000015	1,06587E-08	1,06185E-08	100600	250600	2,31164E-18	2,18E-18
	Equipamento Ant	1,5	X				141,8	0,0000015	1,05783E-08					
	Equipamento Ant	2,5	X				67,96	0,0000015	2,20718E-08	2,22567E-08		350600	2,26285E-18	
	Equipamento Ant	2,5	X				66,84	0,0000015	2,24417E-08					
	Equipamento Ant	3,5	X				45,41	0,0000015	3,30324E-08	3,30798E-08		450600	1,96647E-18	
	Equipamento Ant	3,5	X				45,28	0,0000015	3,31272E-08					
Identificação do provete	Equipamento utilizada	Pressão manométrica (bar)	Tubo				Tempo	Volume de cada tubo	Qi (m ³ /s)	Qi média (m ³ /s)	Pressão Atm (N/m ²)	Pressão Abs. (N/m ²)	Permeabilidade Oxigénio (m ²)	Permeabilidade Oxigénio Média K _{oxig} (m ²)
Série de argamassa Durabilidade 95C_5FCC	Equipamento Ant	1,5	X				137,27	0,0000015	1,09274E-08	1,09182E-08	100600	250600	2,37689E-18	1,9E-18
	Equipamento Ant	1,5	X				137,50	0,0000015	1,09091E-08					
	Equipamento Ant	2,5	X				91,17	0,0000015	1,64528E-08	1,6479E-08		350600	1,67543E-18	
	Equipamento Ant	2,5	X				90,88	0,0000015	1,65053E-08					
	Equipamento Ant	3,5	X				52,06	0,0000015	2,88129E-08	2,91441E-08		450600	1,73251E-18	
	Equipamento Ant	3,5	X				50,89	0,0000015	2,94753E-08					
													Média total Ki	2,61E-18

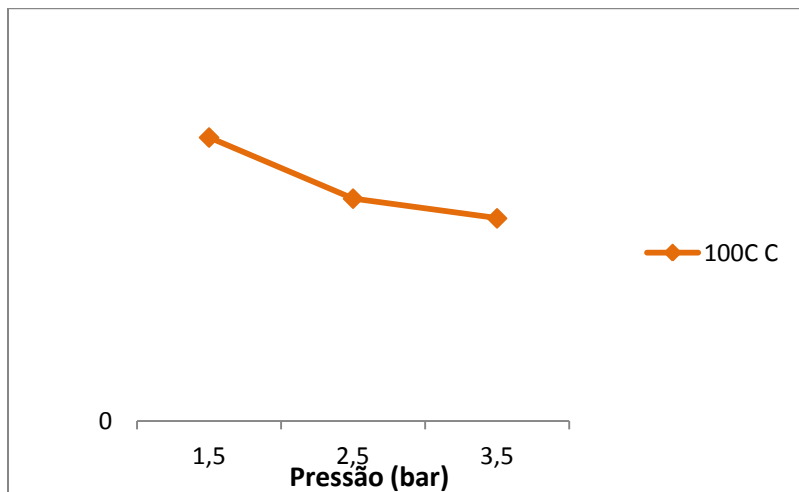
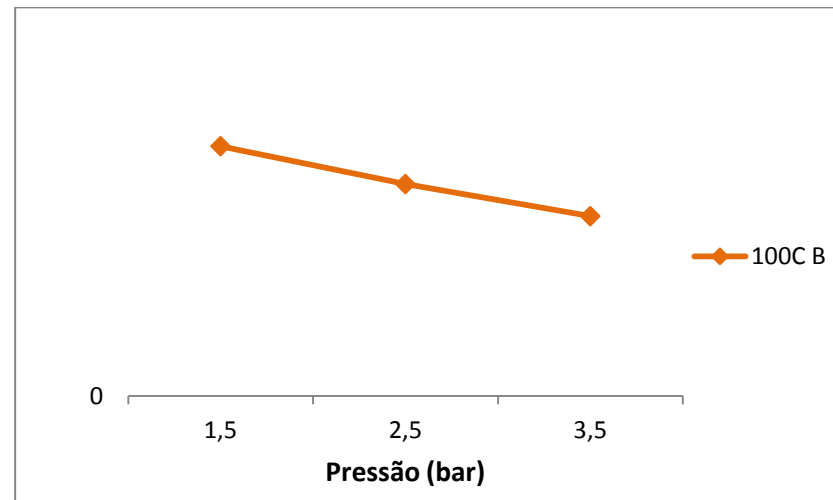
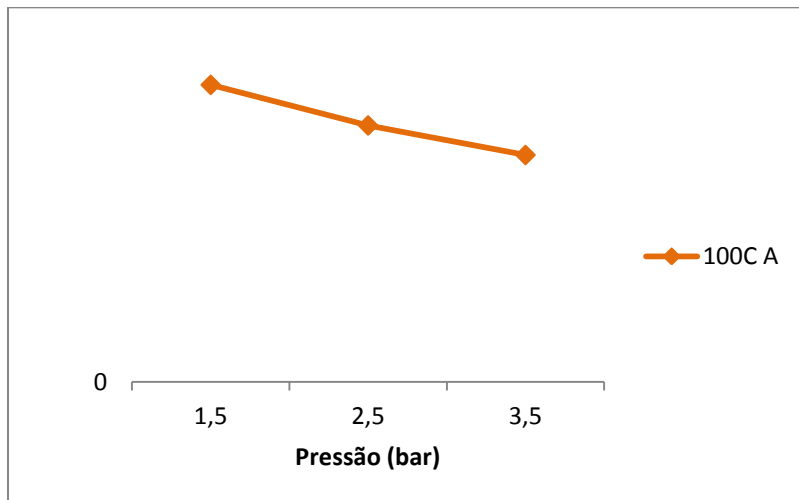
Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

Identificação do provete	Equipamento utilizada	Pressão manomé	Tubo				Tempo	Volume de cada tubo	Qi (m ³ /s)	Qi média (m ³ /s)	Pressão Atm (N/m ²)	Pressão Abs. (N/m ²)	Permeabilidade Oxigénio (m ²)	Permeabilidade Oxigénio Média K _{oxig}
			1	2	3	4								
Série de argamassa Durabilidade 90C_10FCC A	Equipamento Antigo	1,5	X				69,60	0,0000015	2,15517E-08	100600	250600	4,65171E-18	4,53E-18	
	Equipamento Antigo	1,5	X				70,81	0,0000015	2,11834E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				33,67	0,0000015	4,455E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				34,13	0,0000015	4,39496E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				20,10	0,0000015	7,46269E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				20,20	0,0000015	7,42574E-08					
Equipamento Antigo	1,5	X				98,84	0,0000015	1,5176E-08	100600	250600	3,35712E-18	2,93E-18		
Equipamento Antigo	1,5	X				95,75	0,0000015	1,56658E-08						
Equipamento Antigo	2,5	X				51,95	0,0000015	2,88739E-08						
Equipamento Antigo	2,5	X				51,75	0,0000015	2,89855E-08						
Equipamento Antigo	3,5	X				36,18	0,0000015	4,14594E-08						
Equipamento Antigo	3,5	X				35,16	0,0000015	4,26621E-08						
Série de argamassa Durabilidade 90C_10FCC C	Equipamento Antigo	1,5	X				100,35	0,0000015	1,49477E-08	100600	250600	3,23298E-18	2,92E-18	
	Equipamento Antigo	1,5	X				101,67	0,0000015	1,47536E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				49,91	0,0000015	3,00541E-08					
	Equipamento Antigo	2,5	X				52,02	0,0000015	2,88351E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				34,34	0,0000015	4,36808E-08					
	Equipamento Antigo	3,5	X				35,85	0,0000015	4,1841E-08					
												Média total Ki	3,46E-18	

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão

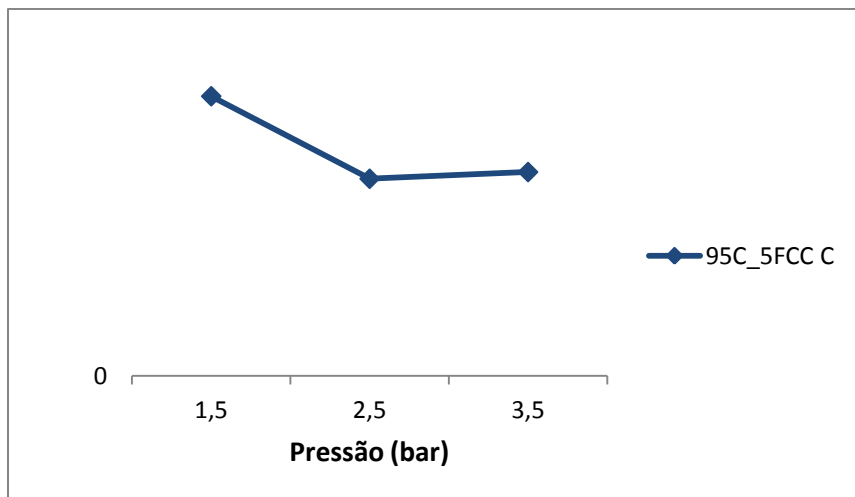
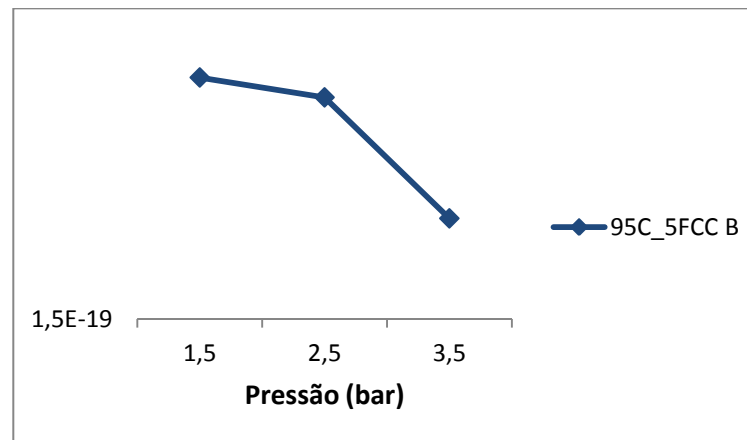
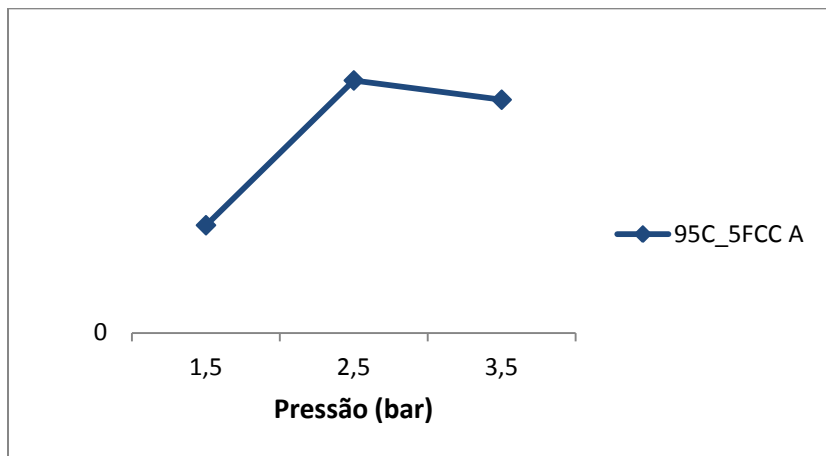
Identificação do provete	Equipamento utilizada	Pressão manométrica (bar)	Tubo				Tempo	Volume de cada tubo	Qi (m ³ /s)	Qi média (m ³ /s)	Pressão Atm (N/m ²)	Pressão Abs. (N/m ²)	Permeabilidade Oxigénio (m ²)	Permeabilidade Oxigénio Média K _{oxig}
			1	2	3	4								
Série de argamassa Durabilidade 85C_15FCC A	Equipamento A	1,5	X				45,80	0,000005	1,0917E-07	100600	250600	2,30426E-17	3,09E-17	
	Equipamento A	1,5	X				48,77	0,000005	1,02522E-07					
	Equipamento A	2,5	X				23,15	0,000005	2,15983E-07					
	Equipamento A	2,5	X				23,50	0,000005	2,12766E-07					
	Equipamento A	3,5		X			24,76	0,00002	8,07754E-07					
	Equipamento A	3,5		X			25,02	0,00002	7,99361E-07					
Série de argamassa Durabilidade 85C_15FCC B	Equipamento A	1,5	X				64,96	0,0000015	2,30911E-08	100600	250600	5,08269E-18	4,30E-18	
	Equipamento A	1,5	X				63,55	0,0000015	2,36035E-08					
	Equipamento A	2,5	X				37,84	0,0000015	3,96406E-08					
	Equipamento A	2,5	X				36,94	0,0000015	4,06064E-08					
	Equipamento A	3,5	X				23,46	0,0000015	6,39386E-08					
	Equipamento A	3,5	X				24,12	0,0000015	6,21891E-08					
Série de argamassa Durabilidade 85C_15FCC C	Equipamento A	1,5	X				62,31	0,0000015	2,40732E-08	100600	250600	5,27178E-18	4,69E-18	
	Equipamento A	1,5	X				61,58	0,0000015	2,43586E-08					
	Equipamento A	2,5	X				32,95	0,0000015	4,55235E-08					
	Equipamento A	2,5	X				33,45	0,0000015	4,4843E-08					
	Equipamento A	3,5	X				21,78	0,0000015	6,88705E-08					
	Equipamento A	3,5	X				20,77	0,0000015	7,22195E-08					
												Média total Ki	4,30E-18	

Anexo J.2 – Permeabilidade ao oxigénio – desvio dos resultados da linearidade



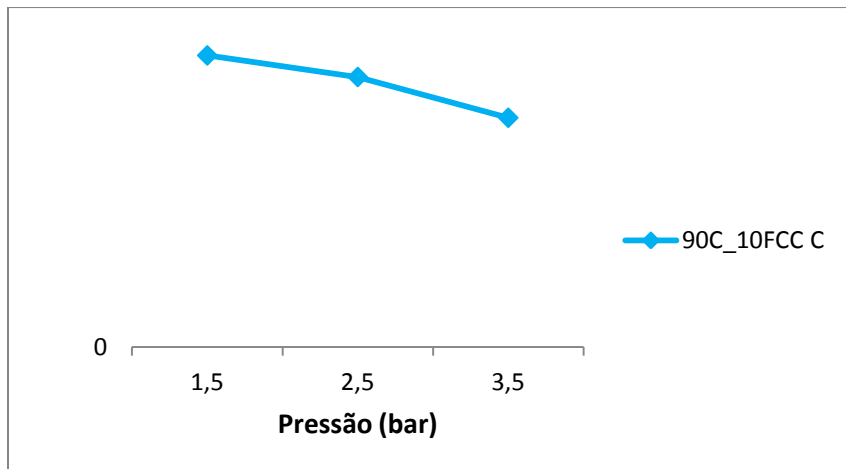
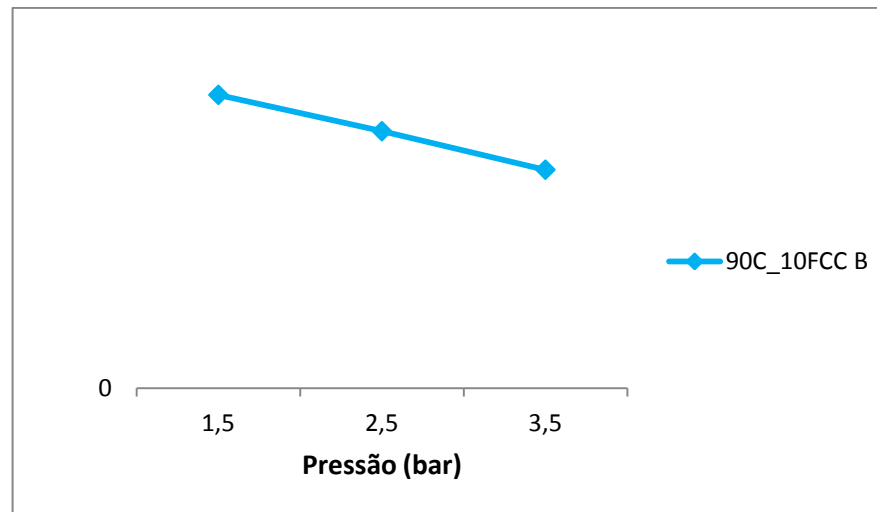
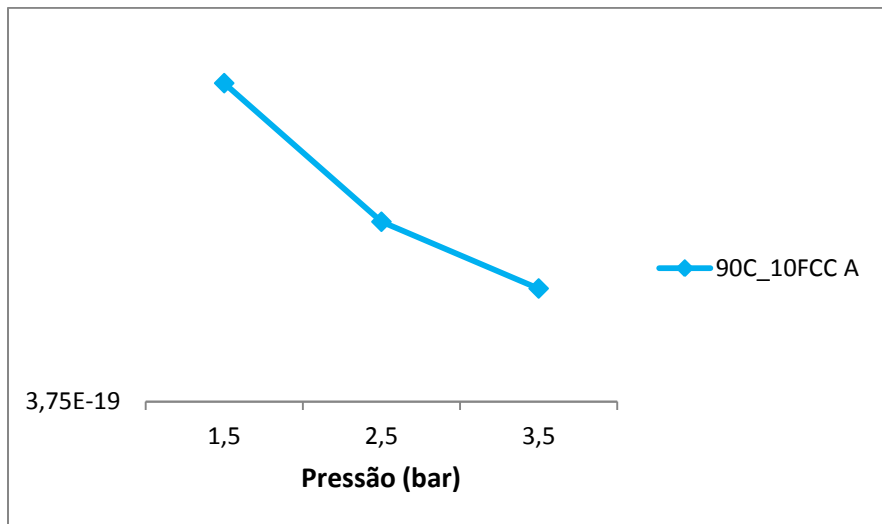
Desvio dos Resultados da linearidade		
Provetes	Pressão (bar)	Caudal/Pressão
100C A	1,5	2,5832E-19
	2,5	2,23063E-19
	3,5	1,97354E-19
100C B	1,5	2,14146E-19
	2,5	1,81648E-19
	3,5	1,54092E-19
100C C	1,5	2,10336E-19
	2,5	1,64996E-19
	3,5	1,50392E-19

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão



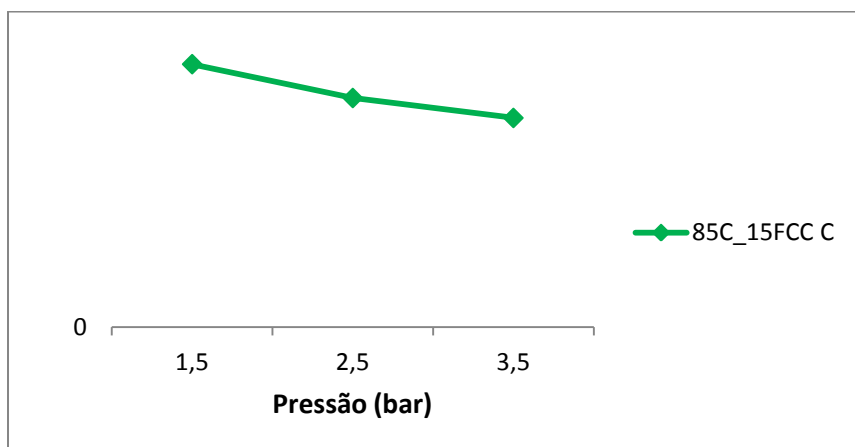
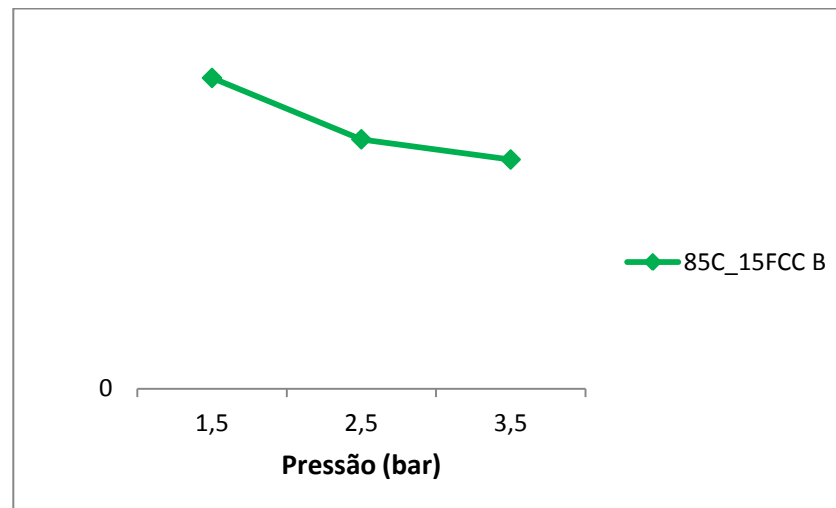
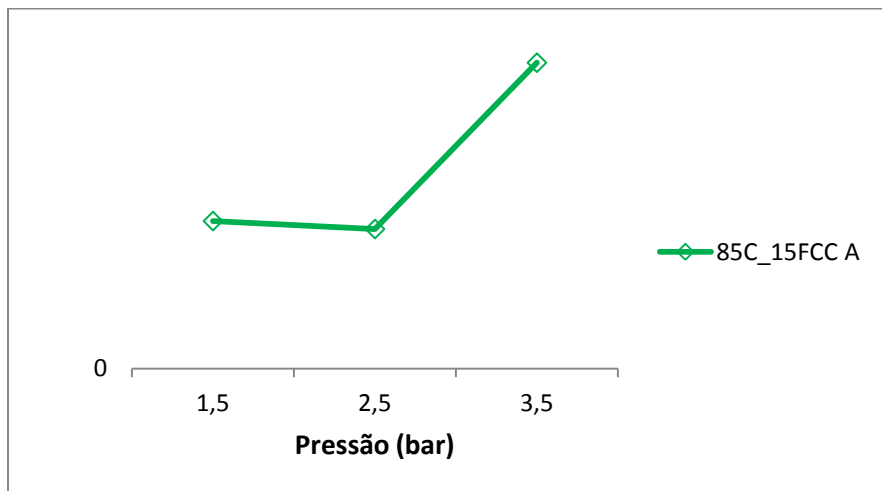
Desvio dos Resultados da linearidade		
Provetes	Pressão (bar)	Caudal/Pressão
95C_5FCC A	1,5	1,45912E-19
	2,5	3,42376E-19
	3,5	3,16197E-19
95C_5FCC B	1,5	2,01566E-19
	2,5	1,97311E-19
	3,5	1,71469E-19
95C_5FCC C	1,5	2,07256E-19
	2,5	1,46091E-19
	3,5	1,51068E-19

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão



Desvio dos Resultados da linearidade		
Provetes	Pressão (bar)	Caudal/Pressão
90C_10FCC A	1,5	4,05611E-19
	2,5	3,92286E-19
	3,5	3,85871E-19
90C_10FCC B	1,5	2,92728E-19
	2,5	2,56469E-19
	3,5	2,18022E-19
90C_10FCC C	1,5	2,81903E-19
	2,5	2,61034E-19
	3,5	2,21651E-19

Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão



Desvio dos Resultados da linearidade		
Provetes	Pressão (bar)	Caudal/Pressão
85C_15FCC A	1,5	2,00923E-18
	2,5	1,90048E-18
	3,5	4,16524E-18
85C_15FCC B	1,5	4,43191E-19
	2,5	3,55705E-19
	3,5	3,26891E-19
85C_15FCC C	1,5	4,59679E-19
	2,5	4,00561E-19
	3,5	3,6567E-19

