

Cimentos-cola com incorporação de resíduo da Indústria Petrolífera

JOÃO DO REGO GONÇALVES

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

Orientador:

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa, Prof. Coordenadora (ISEL)

Coorientador:

Engenheiro, José Domingos Costa, CIARGA, Argamassas Secas, S.A.

Júri:

Presidente:

Doutor, Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Vogais:

Doutora, Maria Ana Carvalho Viana Baptista

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa

Março 2017

Cimentos-cola com incorporação de resíduo da Indústria Petrolífera

JOÃO DO REGO GONÇALVES

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

Orientador:

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa, Prof. Coordenadora (ISEL)

Coorientador:

Engenheiro, José Domingos Costa, CIARGA, Argamassas Secas, S.A.

Júri:

Presidente:

Doutor, Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Vogais:

Doutora, Maria Ana Carvalho Viana Baptista

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa

Março 2017

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho final de mestrado representa o culminar de um ciclo de estudos e de uma fase da minha vida, cujo sucesso é indissociável do apoio de diversas pessoas. É meu dever reconhecer individualmente esse apoio, lamentado desde já a omissão inadvertida de qualquer nome.

Agradeço à minha orientadora, Professora Dr.^a Carla Costa, em primeiro lugar, pela confiança que em mim depositou ao aceitar-me como seu orientando e pelo apoio prestado através do seu sentido crítico, rigor científico e confiança transmitida. Gostaria de lhe agradecer pela disponibilidade inexcedível que sempre demonstrou e pela proximidade com que acompanhou todas as fases de desenvolvimento do trabalho.

Ao meu coorientador, Eng.^o José Costa, pelo conhecimento científico emprestado a este trabalho e pela disponibilidade demonstrada e imprescindível para a análise dos resultados.

Ao Sr. Pedro Carrasco, técnico do laboratório da CIARGA, que me recebeu de forma atenciosa e a quem agradeço as várias horas despendidas comigo no laboratório. Sem o seu conhecimento e experiência não me teria sido possível realizar a campanha experimental, prevista para este trabalho, de forma coerente e expedita.

Ao António Fernandes, à altura técnico, do Laboratório de Materiais de Construção do ISEL, agradeço o apoio demonstrado e todo o conhecimento transmitido, durante a parte da campanha experimental realizada neste laboratório.

Aos meus colegas, Marco e Daniel, com quem iniciei esta experiência e que foram sempre uma fonte de apoio e crítica a este trabalho.

À CIARGA agradeço a disponibilização do seu laboratório, de todo o equipamento de ensaios e de todos os materiais e utensílios necessários à boa execução da campanha experimental.

À Inês, agradeço a disponibilidade e o apoio incondicionais, a compreensão, o estímulo e a motivação constantes, fundamentais para a conclusão deste ciclo da minha vida.

A toda a minha família, por acreditarem sempre em mim, e em particular aos meus pais, que possibilitaram a realização deste percurso académico e a quem nunca poderei retribuir suficientemente. Ao meu irmão.

RESUMO

Os ladrilhos cerâmicos, utilizados em Portugal ininterruptamente há mais de cinco séculos, constituem uma solução eficiente, prática e de baixo custo, e ao mesmo tempo uma forma de qualificação estética dos espaços interiores e exteriores dos edifícios e espaços urbanos. Os ladrilhos caracterizam-se pela baixa permeabilidade ou mesmo impermeabilidade, resistência ao desgaste, facilidade de manutenção e limpeza, face a outras soluções de revestimento de paramentos verticais e horizontais.

A aplicação de ladrilhos é indissociável da produção de argamassas colantes, que sofreram uma grande evolução em meados do século XX com o início da produção de argamassas secas pré-doseadas e a incorporação de adjuvantes, nomeadamente os retentores de água e os ligantes poliméricos, que possibilitaram a redução da espessura a aplicar destes materiais e aumentam a capacidade colante. Esta evolução deu origem a uma nova geração de produtos, os adesivos para ladrilhos, que incluem os cimentos-cola, cujo ligante é o cimento.

À produção de cimento está associado a um impacto ambiental significativo, resultado do consumo de matérias-primas não renováveis e da emissão de CO₂. Uma das formas de mitigar este impacto e contribuir para uma construção mais sustentável, é reduzir a quantidade de cimento utilizado em produtos de construção em particular se, em simultâneo, se reutilizar subprodutos de outras indústrias. É neste sentido que surge a presente dissertação, que pretende contribuir para o desenvolvimento de cimentos-cola com menores teores de cimento, ao substituí-lo parcialmente por resíduo um resíduo gerado em refinarias de petróleo em concreto, o catalisador usado da unidade de *cracking* catalítico em leito fluidizado (FCC – *fluid catalytic cracking*).

Neste contexto foram preparadas duas séries de cimentos-cola, que pretendiam reproduzir dois tipos de cimentos-cola com exigências funcionais distintas, nas quais o cimento foi sendo parcialmente substituído pelo resíduo de catalisador de FCC em percentagens até 50%, em massa, cimento. O objetivo foi avaliar a evolução das características dos dois cimentos-cola em função do aumento do teor de resíduo de catalisador de FCC, e comparar os valores obtidos com os de duas misturas de referência que pretendiam reproduzir da melhor forma possível os cimentos-cola correspondentes, comercializados pela CIARGA.

As propriedades dos cimentos-cola foram avaliadas através da realização dos ensaios previstos na norma NP EN 12004:2007+A1, e incluíram a determinação da tensão de aderência em diversas condições de envelhecimento das amostras e após tempo

aberto, a identificação dos modos de rotura na falha, a capacidade de transferência de cimento-cola para o ladrilho, a resistência ao escorregamento e a deformação transversal do cimento-cola.

A substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador de FCC conduz a uma diminuição da trabalhabilidade das misturas em ambas as séries – MC_FCC e MCR_FCC. Na série MC_FCC, a tensão de aderência, principal característica dos cimentos-cola, atinge um máximo nos cimentos-cola em que o teor de substituição foi de 12,5%. Na série MCR_FCC, em 3 ensaios (aderência após imersão em água, após envelhecimento por calor e após tempo aberto de 30 minutos) o valor mais elevado da tensão de aderência foi atingido pelos cimentos cola com 25% de teor de substituição. Todos os cimentos-cola da série MC_FCC cumpriram o requisito da norma para um cimento-cola do tipo especificado. No caso da série MCR_FCC, apenas o cimento-cola MCR_FCC50 não cumpriu o requisito da norma, no caso do ensaio de determinação da tensão de aderência pós envelhecimento em água.

A resistência ao escorregamento tende a diminuir nos cimentos-cola com teores de substituição a partir de 25%, inclusive. Os cimentos-cola com 12,5 de teor de substituição apresentam um escorregamento superior, mas muito próximo, do verificado para o cimento-cola de referência. Os cimentos-cola do tipo reproduzido pela série MCR_FCC cumpriram todos o requisito normativo.

A substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador de FCC, em cimentos-cola, reflete-se na diminuição da quantidade de cimento consumido, e conseqüentemente na redução das emissões de CO₂, bem como na redução do consumo de matérias-primas não renováveis, contribuindo ao mesmo tempo para a melhoria das características dos cimentos-cola, quando comparados com os produtos atualmente comercializados.

PALAVRAS-CHAVE: Cimento; Impacto ambiental; Cimento-cola; Resíduo de catalisador de FCC; Reutilização de resíduos industriais.

ABSTRACT

Ceramic tiles have been used in Portugal for more than five centuries. Besides being an inexpensive and practical solution for wall cladding, it is also a way of qualifying, aesthetically, the interior and exterior spaces of buildings and urban spaces. Ceramic tiles are known to be impermeable, resistant to wear and easy to maintain and clean when compared to other surface coating solutions.

The production of adhesive mortars, essential for tiling, suffered a significant evolution in the twentieth century namely associated to the production of dry-mix mortars, which allowed different additions and admixtures incorporation on their compositions. That led to their technical performance improvement. The addition of water retention agents, specifically, made possible for the mortars to be applied in thinner layers, improving the yield of the adhesive mortar. These polymer-modified pre-packed dry-mix mortars are part of a new kind products, the *adhesives for tiles*. These family of materials include the cementitious adhesives, using cement as binder.

Cement production is accountable for a considerable environmental impact due to the consumption of non-renewable raw materials and CO₂ emissions. Reducing the cement consumption, by reutilizing waste products from other industries, is one way of lowering this environmental impact and contribute to a more sustainable construction. Considering this actions, the aim of this thesis is to contribute to the development of new cementitious adhesives with less cement, by partially replacing it with spent FCC (fluid catalytic cracking) catalyst.

Two series of cementitious-adhesive mixtures were prepared and, in which, the rate of cement replacement by spent FCC catalyst in each mixture was incrementally increased up to 50 percent of the total mass of binder. The objective was to assess the evolution of the cementitious-adhesives' characteristics in relation to the amount of cement replaced and compare those values with those of the reference mixtures. Reference mixtures were prepared as a way of reproducing the type of cementitious adhesives sold by CIARGA, and thus having a term of comparison.

The characteristics of each mixture were determined by using the test methods referred on the European norm EN 12004:2007+A1 bond adhesive strength under various types of conditioning, open time, slip and transverse deformation.

The partial replacement of cement by spent FCC catalyst led to a reduction of the mixtures' workability. Considering the MC_FCC adhesives, the tensile adhesion strength peaks when the cement is replaced by FCC at a 12,5 percentage. When evaluating the

MCR_FCC adhesives, the top tensile adhesion strength is measured for the MCR_FCC25 adhesive for 3 testes (adhesion strength after water immersion, after heat aging and after open time 30 minutes). All adhesives, except for MCR_FCC50 in the adhesion after heat aging test, complied with the requirements stated on the standard for an adhesive of the specified type.

The slip decreases for the mixtures with 25% and more of replacement rate. For adhesives with a 12,5% replacement rate, the measured slip is higher, but very close to those with no FCC. All adhesives in the MCR_FCC series achieved enough slip resistance to be classified as an adhesive with reduced slip

The incorporation of waste FCC catalyst in cementitious adhesives leads to a reduction of CO₂ emissions as well as a reduction of raw-materials consumption, while improving the characteristics of the cementitious adhesives compared to those currently marketed.

KEYWORDS: Cement; Environmental impact; Cementitious adhesives; Spent FCC catalyst; Industrial waste reuse.

ÍNDICE DO TEXTO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA	1
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.4 ABORDAGEM METODOLÓGICA	3
1.5 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 SÍNTESE DE CONHECIMENTOS	5
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2 A PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DO CIMENTO-COLA	6
2.3 O CIMENTO-COLA	7
2.3.1 CIMENTO	11
2.3.2 AGREGADO	12
2.3.3 ADITIVOS	13
2.3.4 ADIÇÕES	14
2.4 RESÍDUO DE CATALISADOR EXAUSTO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA	15
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL	21
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
3.2 MATERIAIS	22
3.2.1. Ligante hidráulico	23
3.2.2. FCC	23
3.2.3. Agregado	24
3.2.4. Filler	24
3.2.5. Aditivos	25
3.3 PLANO DE ENSAIOS	25
3.4 PROCEDIMENTO DE MISTURA DOS CIMENTOS-COLA	27
3.5 ENSAIOS	29

3.5.1	Determinação da Resistência à Tração De Cimentos-Cola	29
3.5.1.1	Aderência com cura normal	31
3.5.1.2	Aderência após imersão em água.....	33
3.5.1.3	Aderência após envelhecimento por aquecimento	34
3.5.2	Tipologias de rotura nos ensaios de ensaios de aderência.....	34
3.5.3	Capacidade de transferência do cimento-cola para o ladrilho.....	36
3.5.4	Determinação do Tempo Aberto	38
3.5.5	Determinação do Escorregamento	39
3.5.6	Determinação da Deformação Transversal.....	41
4.	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	45
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	45
4.2.	SÉRIE DE CIMENTOS-COLA MC_FCC.....	45
4.2.1.	TENSÃO DE ADERÊNCIA	46
	TENSÃO DE ADERÊNCIA COM CURA NORMAL	48
	TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS IMERSÃO EM ÁGUA	50
	TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS ENVELHECIMENTO POR CALOR.....	50
	TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS “TEMPO ABERTO”	51
	MODO DE FALHA NAS ROTURAS.....	52
4.2.2.	CAPACIDADE DE TRANSFERÊNCIA DO CIMENTO-COLA PARA O LADRILHO.....	54
4.2.3.	RESISTÊNCIA AO ESCORREGAMENTO	56
4.3.	SÉRIE DE CIMENTOS-COLA MCR_FCC	58
4.3.1.	TENSÃO DE ADERÊNCIA	58
	TENSÃO DE ADERÊNCIA COM CURA NORMAL	60
	TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS IMERSÃO EM ÁGUA	60
	TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS ENVELHECIMENTO POR CALOR.....	61
	TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS “TEMPO ABERTO”	62
	MODO DE FALHA NAS ROTURAS.....	63
4.3.2.	CAPACIDADE DE TRANSFERÊNCIA DO CIMENTO-COLA PARA O LADRILHO.....	66

4.3.3.	RESISTÊNCIA AO ESCORREGAMENTO	67
4.3.4.	DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL	69
4.4.	SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	70
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	73
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	73
5.2.	SÉRIE MC_FCC	73
5.3.	SÉRIE MCR_FCC	75
5.4.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	76
	LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	i
	ANEXOS	i
ANEXO A -	FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS	i
ANEXO B -	FICHAS COM RESULTADOS DOS ENSAIOS	i
ANEXO C -	FOTOGRAFIAS DAS AMOSTRAS DO ENSAIO DE MOLHABILIDADE	

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Classes dos adesivos segundo a norma EN 12004	9
Quadro 2.2 - Classificação, designação e descrição de alguns cimentos-cola, a título exemplificativo, segundo a norma NP EN 12004:2007+A1	9
Quadro 2.3 – Características fundamentais e opcionais consideradas na norma EN 12004:2007+A1 para os cimentos-colas, respetivos requisitos dos cimentos-cola (C) e normas que descrevem o método de ensaio	10
Quadro 2.4 - Classificação e requisitos normativos aplicáveis aos cimentos-cola das séries MC_FCC e MCR_FCC	11
Quadro 3.1 - Composição e nomenclatura dos cimentos-cola preparados para a realização da campanha experimental.....	21
Quadro 3.2 - Composição química do FCC	23
Quadro 3.3 - Ensaio realizados para caracterização do agregado utilizado na preparação das misturas	24
Quadro 3.4 - Designação dos ensaios, identificação das respetivas normas e duração dos mesmos	26
Quadro 3.5 - Características, requisitos aplicáveis aos cimentos-cola definidos para a realização da campanha experimental de acordo com a norma EN 12004:2007+A1 ..	27
Quadro 3.6 - Materiais, equipamentos e utensílios utilizados na preparação das amostras e execução dos ensaios referidos no Quadro 3.4 (descritos nas normas EN 1348 e EN 1346)	30
Quadro 4.1 - Resultados da tensão de aderência obtidos com os cimentos-cola da série MC_FCC.....	48
Quadro 4.2 - Capacidade de transferência dos cimentos cola da série MC_FCC expressa através da percentagem da área de ladrilho coberta por cimento cola em função do tempo (t) decorrido entre a aplicação do cimento cola, no suporte, e a aplicação do ladrilho (em min)	55
Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios de escorregamento dos cimentos-cola da série MC_FCC.....	56

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios de aderência, tempo aberto, escorregamento e deformação dos cimentos-cola da série MCR_FCC	59
Quadro 4.5 – Sistematização dos modos de falha na rotura identificadas nos ensaios de determinação da tensão de aderência para os cimentos-cola da série MCR_FCC	63
Quadro 4.6 – Capacidade de transferência dos cimentos-cola da série MCR_FCC expressa através da percentagem da área de ladrilho coberta por cimento-cola em função do tempo (em minuto)	67
Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de determinação do escorregamento dos cimentos-cola da série MCR_FCC.....	68
Quadro 4.8 - Resultados dos ensaios de determinação da deformação transversal dos cimentos-cola da série MCR_FCC.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Procedimento de mistura de acordo com as normas de ensaio previstas na EN 12004:2007+A1	28
Figura 3.2 - Procedimento de mistura adotado na realização da campanha experimental	28
Figura 3.3 - Aspeto da placa de cimento após aplicação da camada de cimento-cola talochada na preparação da amostra para o ensaio de resistência à tração.....	30
Figura 3.4 - Aspeto da placa com os ladrilhos aplicados e com o peso sobre os ladrilhos acabados de aplicar.....	31
Figura 3.5 - Equipamento de ensaio de tração: HOYTOM 07M6498.1	32
Figura 3.6 - placas imersas em água	33
Figura 3.7 - Representação esquemática das tipologias de rotura nos ensaios de aderência e respetiva nomenclatura de acordo com a norma EN 12004:2007+A1	35
Figura 3.8 - Placa de cimento, na vertical, após a aplicação dos ladrilhos e remoção da fita adesiva, para determinação do escorregamento.....	40
Figura 3.9 - Molde metálico que garante a produção da amostra com as dimensões requeridas.....	41
Figura 3.10 - Cunha metálica.....	41
Figura 3.11 - Esquema, em vista, do equipamento para realização do ensaio de deformação transversal; (1) suporte, (2) amostra.	42
Figura 3.12 - Equipamento e amostra utilizados no ensaio de determinação da deformação transversal	42
Figura 4.1 - Apresentação gráfica dos resultados (e respetivos desvios padrão) da tensão de aderência, obtidos com os cimentos-cola da série MC_FCC. A linha a vermelho indica os requisitos mínimos, impostos pela norma NP EN 12004, para um cimento-cola do tipo reproduzido pela série MC_FCC	48
Figura 4.2 - Fotografia da superfície de rotura de um ladrilho no qual se usou o cimento-cola MC_FCC50 em cura normal após o ensaio de determinação da tensão de aderência. Modo de falha da rotura AF-T.....	53

Figura 4.3 - Fotografia da superfície de rotura de um ladrilho no qual se usou o cimento cola MC_FCC50, após o ensaio de determinação da tensão de aderência após “tempo aberto 20 minutos. Modo de falha na rotura: AF T com alguma área de CF-A.....	53
Figura 4.4 - Foto do cimento cola MC_FCC37,5 (aplicado ao fim de 60 min e retirado após 10 min) pondo em evidência a matriz usada para identificar a percentagem da área do ladrilho - 33 % - para a qual ocorreu transferência.....	54
Figura 4.5 - Resultados dos ensaios de escorregamento obtidos com os cimentos-cola da série MC_FCC	57
Figura 4.6 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios de aderência dos cimentoscola da série MCR_FCC	59
Figura 4.7 - Figuras de rotura do ensaio de aderência com cura normal para os cimentos-cola: a) MCR_FCC0 – CF-A; b) MCR_FCC12,5 – CF-A; c) MCR_FCC37,5 – AF-T; d) MCR_FCC50 – AF-T	64
Figura 4.8 - Figuras de rotura no ensaio de aderência inicial após imersão em água para as misturas: a) MCR_FCC0 – AF-T; b) MCR_FCC12,5 – AF-T; c) MCR_FCC25 – AF-T; d) MCR_FCC37,5 – AF-T	65
Figura 4.9 - Figuras de rotura no ensaio de aderência inicial após envelhecimento por calor para as misturas: a) MCR_FCC12,5 – CF-A, CF-S e b) MCR_FCC25 – CF-A, CF-S.....	66
Figura 4.10 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de determinação do escorregamento dos cimentos-cola da série MCR_FCC.....	68
Figura 4.11 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de deformação transversal para todas as misturas da série MCR_FCC.....	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CEM – Cimentos correntes

CFC - Clorofluorcarbonetos

CIARGA – Empresa: Argamassas Secas S.A.

EN – Norma Europeia

FCC – *fluid catalytic cracking*

GEE – Gases de efeito de estufa

HFC - Hidrocarbonetos fluorados

ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

MC - Metilcelulose

NP – Norma Portuguesa

PFC - Hidrocarbonetos perfluorados

PR – Polímero redispersível

TFM – Trabalho Final de Mestrado

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente documento apresenta o trabalho desenvolvido durante o período compreendido entre os meses de fevereiro de 2016 e setembro do mesmo ano, sob a orientação da Professora Carla Maria Costa do ISEL e coorientação do Eng.º José Domingos Costa da CIARGA. A elaboração deste documento visa a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na área de especialização de Edificações.

1.2 ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

O setor da Construção Civil tem uma importância muito significativa no conjunto das economias a nível mundial devido à extensa cadeia de valor que cria. O impacto deste setor faz-se sentir em empresas de outros setores, quer a montante quer a jusante, como são disso exemplo os setores bancário e imobiliário [1]. A globalidade e a grande diversidade de operações produtivas que lhe estão associadas traduzem-se num impacto ambiental significativo, causado pelo consumo de recursos não renováveis e pela emissão de gases poluentes [2]

A indústria da construção civil ainda é sinónimo de betão, que é, a seguir à água, o material mais consumido no planeta, com um consumo anual *per capita* de 3 toneladas[2]. O cimento é, não só o principal constituinte do betão, como também um material essencial à atividade da construção, estando presente em inúmeros produtos – argamassas de assentamento ou revestimento, blocos, cimentos-cola, entre outros – sendo que a sua produção tem crescido cerca de 2,5% anualmente [2]. O impacto ambiental pelo qual a indústria do cimento é responsável, deve-se ao consumo de matérias-primas, calcário e argila, e à emissão de CO₂ para a atmosfera. Em concreto, por cada tonelada de cimento produzido são consumidas cerca de 1,7 tonelada de matérias-primas e emitidos cerca de 900 kg de CO₂ para a atmosfera [3]. As emissões de CO₂ com origem na produção de cimento constituem entre 5 a 7 % das emissões de CO₂ globais de origem humana, diretamente, através da calcinação do calcário e da argila, e indiretamente, pelo consumo de combustíveis fósseis utilizados no aquecimento dos fornos e no transporte das matérias-primas e do produto acabado [2]. A mitigação deste impacto ambiental pode ser conseguida através de práticas associadas à construção sustentável, como sendo: a reutilização de resíduos de outras

indústrias como substitutos de matérias primas, a otimização do consumo energético das fábricas, a utilização de combustíveis alternativos e a substituição parcial de cimento por subprodutos industriais [3] .

É neste contexto que surge o tema para o presente TFM, em que se propõe a substituição parcial do cimento, presente nos cimentos-cola pré-fabricados, por um resíduo gerado pela indústria petrolífera, cuja atividade pozolânica foi comprovada em trabalhos anteriores [4] a [8] . O resíduo em causa é o catalisador exausto gerado na unidade de “*cracking*” catalítico em leito fluidizado (FCC – do inglês *fluid catalytic cracking*), em particular o resíduo produzido na unidade de FCC da refinaria de Sines da Petrogal, que apresenta atividade pozolânica e viabilidade de incorporação em materiais à base de cimento, demonstrada em trabalhos académicos anteriores [4] , [9] a [13] .

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste TFM é contribuir para o desenvolvimento de novos cimentos-cola com menor teor de cimento nas suas composições, diminuindo o consumo de um produto cujo impacto ambiental é por demais significativo. Neste trabalho pretende-se estudar, em particular, a viabilidade da substituição parcial de cimento por FCC em cimentos-cola comerciais, na perspetiva de estabelecer novas composições destes produtos pré-doseados.

De forma a avaliar essa viabilidade, pretende-se:

- Avaliar o efeito da substituição parcial de cimento pelo resíduo de FCC nas propriedades, em particular a adesão, escorregamento e deformação transversal dos cimentos-cola
- Avaliar as características de desempenho dos cimentos-cola com incorporação de FCC à luz das especificações requeridas pelas normas europeias em vigor
- Comparar as características dos cimentos-cola com incorporação de FCC com as dos cimentos-cola comerciais da CIARGA.

A avaliação de um espetro de percentagens de substituição tem como objetivo final a definição de uma percentagem ótima de substituição de cimento por FCC, para o qual exista, possivelmente, uma melhoria das características de desempenho do cimento-cola.

1.4 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A metodologia científica empreendida para alcançar os objetivos descritos anteriormente é descrita neste subcapítulo.

Inicialmente foi necessário proceder ao aprofundamento dos conhecimentos sobre os conceitos fundamentais para a compreensão dos vários fenómenos envolvidos nesta investigação, nomeadamente a hidratação do cimento e a reação pozolânica. Em seguida efetuou-se a análise dos trabalhos académicos e industriais, nacionais e internacionais, elaborados anteriormente sobre o tema em estudo e dos documentos normativos aplicáveis. Deste estudo resultou a elaboração da síntese de conhecimentos que constitui o capítulo 2 deste documento e a definição da campanha experimental descrita no capítulo 3.

Após a realização da campanha experimental, em que foram ensaiados cimentos-cola com diferentes teores de incorporação de FCC, procedeu-se à análise e discussão dos resultados experimentais que se apresenta no capítulo 4. A discussão dos resultados teve em consideração os resultados obtidos em trabalhos académicos e artigos científicos, nacionais e internacionais, relativos a este tema.

O trabalho de investigação e de laboratório empreendidos no âmbito deste TFM, culminaram com a redação do presente documento, no qual foram compiladas e organizadas em textos, figuras e quadros: os conceitos e informações recolhidos e apreendidos, os resultados obtidos, as análises, as discussões e as conclusões apresentadas.

1.5 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Neste capítulo é descrita a estrutura e organização segundo as quais se desenvolve os 5 capítulos deste trabalho.

No primeiro capítulo é realizada uma primeira abordagem ao tema do trabalho, no qual são apresentadas as considerações iniciais, o enquadramento e a justificação da escolha do tema, os objetivos que norteiam o desenvolvimento do mesmo e a abordagem adotada para a sua execução.

O segundo capítulo, de carácter mais teórico, apresenta uma síntese de conhecimentos relevantes para o estudo desenvolvido neste trabalho, nomeadamente: i) enquadramento histórico do cimento, ladrilhos e cimentos-cola; ii) abordagem à problemática ambiental relativa à produção de cimentos-cola; iii) descrição dos materiais constituintes os cimentos-cola; iv) enquadramento do cimento-cola nas normas em vigor; v) efeitos da substituição parcial de cimento por FCC em produtos de construção à base de cimento.

O terceiro capítulo apresenta a descrição da campanha experimental realizada, nomeadamente, os métodos de caracterização dos materiais utilizados nos cimentos-cola estudados, bem como os procedimentos de mistura e de realização dos ensaios sobre os cimentos-cola preparados com diferentes composições. Neste capítulo também se apresenta o plano de ensaios a realizar para cada uma das séries de cimentos-cola. Por fim, são descritos todos os ensaios a realizar de acordo com o previsto na norma NP EN 12004:2007+A1.

O quarto capítulo apresenta, a análise e discussão dos resultados obtidos na campanha experimental. Os resultados são, sempre que possível, expostos em quadros, e gráficos que se apresentam coerentemente (em termos de cores e estrutura) com o objetivo de facilitar a leitura dos resultados, bem como a análise comparativa dos resultados obtidos com cimentos-cola com incorporação de FCC em relação à mistura de referência que reproduz o cimento-cola comercial (que não inclui o resíduo em estudo, na sua constituição).

No capítulo 5 são expostas as conclusões decorrentes do exposto no capítulo 4 e do trabalho realizado no capítulo 3, e a efetividade do trabalho face aos objetivos propostos inicialmente. São analisadas as possíveis contribuições práticas decorrentes desta investigação e propostos trabalhos futuros a realizar no seguimento da elaboração deste trabalho e de forma a complementá-lo.

2 SÍNTESE DE CONHECIMENTOS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria da construção contribui significativamente para o desenvolvimento socioeconómico, tanto de países desenvolvidos, como de países em vias de desenvolvimento. Por um lado, providencia infraestruturas públicas e privadas indispensáveis a várias atividades económicas, como o comércio, serviços e outras indústrias, por outro, emprega um elevado número de pessoas de forma direta e indireta. Na União Europeia, esta indústria gera aproximadamente 10% do PIB e é responsável por 7% do emprego [14]. No entanto, o crescimento económico devido à indústria da construção não é indissociável de aspetos negativos, como o aumento da emissão de gases de efeito de estufa resultantes das várias atividades inerentes a esta indústria.

A emissão de gases de efeito de estufa associada à indústria da construção tem origem sobretudo na produção de cimento, que atingiu os 4600 milhões de toneladas no ano de 2015 [15] e corresponde a cerca de 5% das emissões de CO₂ geradas pela atividade humana [2]. Estas emissões têm como origem a queima de combustíveis fósseis para aquecimento dos fornos em que é produzido o cimento, e no processo de calcinação no qual se forma o hidróxido de cálcio [16]. A produção de cimento também é responsável por um impacto ambiental significativo, devido à exploração e consumo de recursos naturais não renováveis (calcário e argila). No contexto do desenvolvimento e da construção sustentável, a redução do consumo de matérias-primas e recursos energéticos não renováveis, a maximização da reutilização de recursos e a diminuição das emissões de CO₂ assumem um carácter prioritário [3].

Neste sentido, é importante e urgente a implementação de medidas mitigadoras do consumo de cimento, como por exemplo, a identificação e otimização de materiais que possam ser utilizados na produção de materiais de construção à base de cimento, substituindo-o parcialmente sem que as características do produto final sejam afetadas [17]. A reutilização de subprodutos de outras indústrias, com esta finalidade, constitui uma forma de reduzir o consumo e promover a reutilização de matérias-primas [3]. O catalisador exausto da unidade de *cracking* catalítico em leito fluidizado (referido no presente trabalho como catalisador exausto de FCC), um resíduo gerado durante a

refinação de petróleo, é um dos materiais que apresenta características promissoras para ser utilizado com este fim [4] a [13] .

2.2 A PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DO CIMENTO-COLA

As evidências da influência do homem nas alterações climáticas têm vindo a aumentar, sendo o aquecimento global uma consequência inequívoca dessa influência. É extremamente provável que mais de metade do aumento observado na temperatura média da superfície da terra, desde 1951 até 2010, tenha sido provocado pelo aumento da concentração de gases de efeito de estufa (GEE) e outros fatores de origem humana [18] .

A Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada em 1992 no Rio de Janeiro, produziu um tratado, a Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, que considerava as emissões de GEE o principal responsável pelo aquecimento global. O objetivo final deste tratado era a estabilização das concentrações dos GEE na atmosfera, de forma a evitar uma interferência perigosa de origem humana no sistema climático [18] . No âmbito deste tratado surgiu em 1997 um documento de carácter vinculativo, o Protocolo de Quioto, que indicava os compromissos a assumir por cada país signatário em matéria de limitação e redução das emissões de GEE. As disposições deste protocolo incidiam sobre seis GEE: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrocarbonetos fluorados (HFC), hidrocarbonetos perfluorados (PFC) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6) **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Embora os diferentes GEE tenham diferentes capacidades de aprisionar calor, e não sendo o CO_2 o gás com maior capacidade, a sua concentração na atmosfera, tão mais elevada que qualquer um dos outros (cerca de 65%), torna-o o principal responsável pelo aquecimento global [18] [20] . A produção de cimento, a nível mundial, é responsável por 5 a 7 por cento das emissões de CO_2 globais de origem humana [2] . O cimento é o principal constituinte funcional dos cimentos-cola, pelo facto de lhe conferir a sua propriedade ligante, sendo incluído, tipicamente, numa percentagem de 20 a 50 por cento em massa da mistura seca [21] . Adicionalmente, e ainda que presente numa percentagem inferior a outros constituintes, como a areia, é o principal responsável pelo impacto ambiental gerado na produção dos cimentos-cola. O impacto ambiental associado à indústria e produção do cimento não se limita às emissões de CO_2 , podendo ser sistematizados da seguinte forma:

- i. consumo de matérias-primas não-renováveis – para produzir uma tonelada de cimento estima-se que seja necessário, aproximadamente, duas toneladas de calcário e argila [22]
- ii. consumo de combustível – a produção de cimento implica o consumo de quantidades significativas de combustíveis fósseis (em particular para o aquecimento dos fornos) como o carvão e o gás natural [23]
- iii. emissão de CO₂ – por cada tonelada de cimento produzido é emitida, aproximadamente, uma tonelada de CO₂ para a atmosfera, com origem sobretudo no consumo de combustíveis fósseis e na descarbonatação do calcário [2] .

Face ao apresentado, a indústria da construção, e nomeadamente a da produção de cimento, terá de enquadrar a sua atividade no âmbito das disposições adotadas no Protocolo de Quioto. No contexto da produção sustentável de materiais à base de cimento, uma das contribuições possíveis é a utilização de matérias-primas alternativas, nomeadamente resíduos de outras indústrias, como substitutos parciais do cimento. A substituição parcial de cimento em produtos como os cimentos-cola, por subprodutos de outras indústrias, reduz diretamente a produção de cimento, contribuindo para a mitigação do impacto ambiental associado à sua produção: diminuição da exploração de matérias-primas não renováveis e das emissões de CO₂ para a atmosfera.

A produção de cimentos-cola é responsável por outros impactos ambientais que advêm da exploração e produção dos outros constituintes deste produto, como a areia, o *filler*, a metilcelulose e a resina, embora este impacto seja de menor importância face ao provocado pela produção do cimento. Esta questão não será abordada no desenvolvimento deste trabalho (secção 3).

2.3 O CIMENTO-COLA

Os cimentos-cola são materiais utilizados para o assentamento de ladrilhos cerâmicos e pedras naturais. Existem diversos tipos de materiais usados para estes fins, que devem ser escolhidos em função das suas propriedades, do tipo de material a assentar, do suporte e do comportamento final que se pretende obter em função das condições climáticas a que estarão sujeitos. Importa distinguir as argamassas tradicionais de assentamento, que são misturadas em obra e aplicadas em camadas mais espessas, e os adesivos industriais [24] , com constituintes pré-doseados e que podem ser aplicados

em camadas mais finas. Os cimentos-cola inserem-se nesta categoria, sendo estes produtos de construção regulamentados pela NP EN 12004:2007+A1.

A Norma Europeia EN 12004:2007+A1 – *Adhesives for tiles – Requirements, evaluation of conformity, classification and designation* [24] define cimentos-cola como sendo uma:

- *Mistura de ligantes hidráulicos, agregados e aditivos orgânicos. O cimento-cola é misturado com água ou outro líquido imediatamente antes da aplicação.*

Diversos termos como argamassa colante ou argamassa adesiva são empregues na literatura em referência aos cimentos-cola [25]. O termo adesivo é utilizado em sentido lato na norma NP EN 12004:2007+A1 [24], *Adhesives for tiles*, ao referir-se desta forma não só aos adesivos à base de cimento como também aos adesivos de dispersão e aos adesivos de resinas reativas, que são compostos orgânicos com uma constituição química muito diferente dos adesivos à base de cimento, mas cuja função pode ser a mesma. Por este facto, a norma distingue três tipos de adesivos e classifica-os em função do ligante:

- i. Adesivos-cimentícios tipo C (C = base de cimento) – mistura de ligantes hidráulicos, tipicamente cimento, agregados e aditivos orgânicos. Na indústria este tipo de cimentos é correntemente designado por cimentos-cola
- ii. Adesivos em dispersão, tipo D (D = dispersão) – mistura de ligantes orgânicos, na forma polímeros aquosos em dispersão, aditivos orgânicos e cargas minerais
- iii. Resinas reativas, tipo R (R = resinas) – uma mistura resinas sintéticas, aditivos orgânicos e cargas minerais, em que o endurecimento ocorre devido a uma reação química.

O âmbito deste TFM recai sobre os adesivos cimentícios (tipo C) que no decorrer deste trabalho serão referidos como cimentos-cola, por ser esta a sua designação corrente.

A cada tipo de adesivo a norma NP EN 12004:2007+A1 [24] associa diferentes classes que pressupõem diferentes características. As características podem ser fundamentais (1 e 2) e opcionais (E, F, T, S1 e S2) podendo combinar-se uma característica fundamental com quaisquer características opcionais. O Quadro 2.1 resume essas características.

Quadro 2.1 - Classes dos adesivos segundo a norma EN 12004

<i>Classe</i>	<i>Características fundamentais</i>
1	normal
2	melhorada
<i>Classe</i>	<i>Características opcionais</i>
E	tempo aberto alargado
F	presa rápida
T	escorregamento reduzido
S1	deformável
S2	altamente deformável

A designação completa dos adesivos compreende a letra referente ao tipo, seguida de uma ou mais letras relativas à classe, como nos exemplos do Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Classificação, designação e descrição de alguns cimentos-cola, a título exemplificativo, segundo a norma NP EN 12004:2007+A1

DESIGNAÇÃO		DESCRIÇÃO
Tipo	Classe	
C	1	cimento-cola com presa normal
C	1FTES1	cimento-cola normal com presa rápida, escorregamento reduzido, tempo aberto alargado e deformável
C	2ETS2*	cimento-cola melhorado, com tempo aberto alargado, escorregamento reduzido e alta deformabilidade

* classificação do cimento-cola reproduzido na série MCR_FCC

A norma NP EN 12004:2007+A1 define, também, as características e os respetivos requisitos a verificar para a classificação dos diferentes tipos de cimentos-cola. O Quadro 2.3 extraído da norma NP EN 12004:2007+A1 sintetiza os requisitos aplicáveis aos cimentos-cola.

Quadro 2.3 – Características fundamentais e opcionais consideradas na norma EN 12004:2007+A1 para os cimentos-colas, respetivos requisitos dos cimentos-cola (C) e normas que descrevem o método de ensaio

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS		
1 a	ADESIVOS DE PRESA NORMAL	
Característica	Requisito	Método de Ensaio
Tensão de aderência inicial	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	EN 1348:2007
Tensão de aderência após imersão em água	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	EN 1348:2007
Tensão de aderência após envelhecimento por calor	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	EN 1348:2007
Tensão de aderência após ciclos de gelo-degelo	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	EN 1348:2007
Tempo aberto: tensão de aderência	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não menos de 20 min.	
1 b	ADESIVOS DE PRESA RÁPIDA	
Característica	Requisito	Método de Ensaio
Aderência rápida	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não menos de 6 h	EN 1348:2007
Tempo aberto alargado: tensão de aderência	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não menos de 10 min.	EN 1346
Todos os outros requisitos da Tabela 1a		EN 1348:2007
CARACTERÍSTICAS OPCIONAIS		
1 c	CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS	
Característica	Requisito	Método de Ensaio
Deslizamento	$\leq 0,5 \text{ mm}$	EN 1308
Tempo aberto alargado: tensão de aderência	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não menos de 30 min.	EN 1346
Deformação transversal: adesivo deformável	$\geq 2,5 \text{ mm}$ e $\leq 5 \text{ mm}$	EN 12002
Deformação transversal: adesivo altamente deformável	$\geq 5 \text{ mm}$	EN 12002
1 d	CARACTERÍSTICAS ADICIONAIS	
Característica	Requisito	Método de Ensaio
Elevada tensão de aderência inicial	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	EN 1348:2007
Elevada tensão de aderência após imersão em água	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	EN 1348:2007
Elevada tensão de aderência após envelhecimento por calor	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	EN 1348:2007
Elevada tensão de aderência após ciclos de gelo-degelo	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	EN 1348:2007

A característica fundamental 1 ou 2 do Quadro 2.1 remete para os requisitos da tabela 1a – adesivos de presa normal e 1d – características adicionais, respetivamente. Ou seja, se um cimento-cola for do tipo C 1, terá de verificar os requisitos da tabela 1a, enquanto um cimento-cola melhorado, tipo C 2, terá de verificar os requisitos da tabela 1d.

Os requisitos do Quadro 2.3 associados a:

- 1b deverão ser satisfeitos por cimentos-cola, tanto da classe C 1 e C 2, para serem classificados com a letra F prevista no Quadro 2.1
- 1c deverão ser satisfeitos por cimentos-cola, tanto da classe C 1 e C 2, para serem classificados com a letra E, T, S1 e S2 previstas no Quadro 2.1.

No âmbito deste TFM serão preparadas e analisadas duas séries de cimentos-cola – MC_FCC e MCR_FCC (Quadro 3.1) - com composições distintas e, por isso, classificações e requisitos também eles distintos. A série MC_FCC reproduz um cimento-cola normal para interiores, cujos requisitos são definidos no Anexo ZA.1.1 da EN NP 12004, enquanto que a série MCR_FCC reproduz um cimento-cola com escorregamento reduzido, tempo aberto alargado e altamente deformável, com a

classificação C2 ETS2. Os requisitos normativos que os cimentos-cola de ambas as séries deverão cumprir, para poderem ser classificados como o apresentado no Quadro 2.2, são apresentados no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Classificação e requisitos normativos aplicáveis aos cimentos-cola das séries MC_FCC e MCR_FCC

Série	Classificação do cimento-cola		Característica	Requisito
	Tipo	Classe		
MC_FCC	Anexo ZA.1.1		Tensão de aderência inicial	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$
			Tensão de aderência após imersão em água	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$
MCR_FCC	C	2ETS2	Tensão de aderência inicial	$\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$
			Tensão de aderência após imersão em água	$\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$
			Tensão de aderência após envelhecimento por calor	$\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$
			Tempo aberto (após, no mínimo, 30 min)	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$
			Escorregamento	$\leq 0,5 \text{ mm}$
			Deformação transversal	$\geq 5 \text{ mm}$

Nos pontos seguintes deste subcapítulo serão abordados individualmente os constituintes dos dois cimentos-cola preparados no âmbito deste trabalho, e a sua influência nas características do produto final.

2.3.1 CIMENTO

O cimento é o ligante hidráulico utilizado nos cimentos-cola (C), e é definido pela norma NP EN 197-1 [26] como:

- material inorgânico finamente moído, que quando misturado com água forma uma pasta que faz presa e endurece, através de processos e reações de hidratação e que, depois de endurecida, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo dentro de água.

Os cimentos que cumprem com os critérios de conformidade da EN 197-1 [26] são designados por “cimentos correntes”, ou pela abreviatura CEM, e deverão, quando misturados com agregado e água, ser capazes de produzir betões ou argamassas que mantenham a sua trabalhabilidade durante tempo suficiente, e atingir, após períodos de tempo definidos, os níveis de resistência especificados e manter estabilidade volumétrica [26].

A NP EN 197-1 define os constituintes dos cimentos, para além de especificar os requisitos mecânicos, físicos e químicos que estes deverão observar. Quanto à sua composição existem 27 produtos da família cimentos CEM, agrupados em cinco tipos principais, dependendo da natureza e das proporções dos seus constituintes [26]:

- CEM I – Cimento Portland

- CEM II – Cimento Portland Composto
- CEM III – Cimento de alto-forno
- CEM IV – Cimento Pozolânico
- CEM V – Cimento Composto.

O cimento do tipo CEM I é constituído por 95-100 por cento, em massa, de clínquer e por 0-5 por cento, em massa, de constituintes adicionais minoritários. Este cimento é o ligante hidráulico utilizado nas misturas de cimento-cola preparadas no contexto deste trabalho (capítulo 3).

As propriedades coesivas e adesivas dos cimentos são lhes conferidas através de reações químicas de hidratação (Eq. 2.1 a Eq. 2.4), desencadeadas pela mistura das partículas do cimento com água. O processo de hidratação, à escala macroscópica, conduz à conversão da suspensão água-cimento numa matriz sólida que serve de ligante nos materiais à base de cimento.



sendo:

- C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF - os compostos presentes no cimento, respetivamente, silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico e aluminoferrato tetracálcico
- H - a água (H_2O)
- C-S-H, C-A-H e CH - os compostos resultantes da hidratação do cimento, respetivamente, silicatos de cálcio hidratados, aluminatos de cálcio hidratados e hidróxido de cálcio ($Ca(OH_2)$).

2.3.2 AGREGADO

Os agregados são incorporados nas misturas de cimentos-cola como elementos estruturais, com a função de melhorar a compacidade e conferir estabilidade volumétrica [21]. Usualmente são utilizados em cimentos-cola areias de quartzo ou argila. A areia siliciosa (quartzo) utilizada tem normalmente uma fração granulométrica entre 0,05 a 0,5 mm [21] [27].

Mais recentemente as areias siliciosas de maior densidade (massa volúmica $\approx 2,6$ kg/m³) têm sido substituídas parcialmente por agregados mais leves, como o granulado expandido de vidro (massa volúmica < 500 kg/m³), que conferem à mistura no estado fresco uma consistência mais cremosa e uma trabalhabilidade muito superior [21] .

2.3.3 ADITIVOS

Os aditivos são materiais orgânicos, adicionados, numa percentagem entre 0,2 e 0,5% para os éteres de celulose e entre 0 e 6% para os polímeros redispersíveis, aos materiais cimentícios com o intuito de melhorar a reologia das misturas no estado fresco e/ou as suas características depois de endurecidas. No caso particular dos cimentos-cola, os aditivos utilizados são usualmente: aceleradores ou retardadores de presa, retentores de água e introdutores de ar [21] . No caso dos cimentos-colas, os aditivos só podem ser adicionados à mistura seca na forma de pó, e se forem adicionados mais do que um aditivo, estes devem ser compatíveis entre si [27] .

Neste capítulo serão abordados os aditivos inseridos na constituição dos cimentos-cola estudados neste TFM (Quadro 3.1).

Metilcelulose (éter de celulose)

A metilcelulose (MC) é um éter de celulose, utilizado como agente retentor de água cuja principal função é reter a água no cimento-cola durante um maior período de tempo impedindo a sua passagem para o suporte em que está a ser usado. Desta forma garante-se a existência de água disponível suficiente para permitir a hidratação do cimento.

O mecanismo subjacente à retenção de água é o aumento da viscosidade da água intersticial durante o processo de hidratação do cimento, que dificulta a sua passagem, por capilaridade, para substratos e ladrilhos permeáveis [21] . Um outro mecanismo, subjacente a estes materiais, que limita a perda de água do cimento-cola no estado fresco prende-se com a formação de um filme de baixa permeabilidade na superfície do substrato, formado pelas partículas do agente retentor e do cimento i. e. [21] .

Contudo, o aumento da viscosidade da água intersticial, devido à adição de metilcelulose aumenta a consistência do cimento-cola no estado fresco o que aumenta a quantidade de água necessária para atingir a consistência desejada. O aumento da quantidade de água necessária na mistura aumenta diretamente o rendimento da

mesma, já que a mesma quantidade de mistura seca possibilita a produção de mais cimento-cola depois de adicionada a água [27] [28] .

A adição de metilcelulose para além de melhorar a reologia da mistura, melhora também algumas características: a tensão de aderência, o tempo aberto e a resistência ao deslizamento [27] .

Polímero redispersível

Os polímeros redispersíveis – correntemente designados por resinas - são ligantes orgânicos que conferem maior flexibilidade aos adesivos cimentícios, para além de melhorarem significativamente a sua aderência aos diferentes suportes e ladrilhos. A combinação de ligantes, orgânicos e inorgânicos, dá origem a um cimento-cola com características, nomeadamente a tensão de aderência e deformabilidade elevadas, impossíveis de obter apenas com o ligante inorgânico [27] .

A incorporação de polímeros redispersíveis em adesivos cimentícios prende-se com a necessidade do adesivo ser capaz, em certas utilizações, de deformar-se e absorver tensões resultantes de variações de temperatura elevadas (p. ex em fachadas) ou cargas devidas a utilizações intensas (p. ex. em pavimentos), sem que ocorra perda de adesão [29] .

A produção dos polímeros redispersíveis em pó possibilitou a inclusão destes materiais poliméricos nas misturas secas de cimentos-cola pré-fabricados, dando origem a um produto de alta qualidade, sendo observadas melhorias ao nível da: tensão de aderência em todos os tipos de substratos, flexibilidade e deformabilidade, coesão e densificação (maior impermeabilidade), retenção de água e trabalhabilidade. Este tipo de produção contribuiu também para a eliminação de erros de dosagem durante a mistura dos componentes em obra [27] .

2.3.4 ADIÇÕES

FILLER

Os *fillers* são materiais inertes incorporados em materiais à base de cimento com o objetivo de completar a curva granulométrica da mistura e preencher os poros. A densificação da matriz conduz ao aumento da resistência à compressão e à diminuição da porosidade do cimento-cola no estado fresco [30] . No entanto, embora sejam considerados quimicamente inertes, é referido que a incorporação de *filler* calcário como

substituto parcial do cimento (em percentagens inferiores a 5% em massa) conduz a uma aceleração da reação de hidratação do cimento e a maiores resistências iniciais [3]. O calcário é o material mais frequentemente utilizado como *filler*.

POZOLANAS

O material pozolânico utilizado neste TFM, o FCC, é o objeto de estudo do mesmo, pelo que as sua origem e características serão abordadas num subcapítulo à parte (secção 2.4)

2.4 RESÍDUO DE CATALISADOR EXAUSTO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

O *cracking* catalítico em leito fluidizado (do inglês *fluid catalytic cracking* - FCC) é uma das principais e mais utilizadas tecnologias da indústria da refinação de petróleo, através da qual é convertida uma fração do petróleo bruto em derivados mais leves passíveis de serem utilizados como combustíveis, principalmente a gasolina [31] [32].

Este processo pressupõe a utilização de um catalisador que, embora possa ser regenerado a altas temperaturas e reutilizado, acaba por perder atividade catalítica e é substituído por catalisador fresco [31] [32] [33] [34]. O catalisador retirado do processo, designado por catalisador exausto, é um resíduo usualmente enviado para aterro [35] [36]. O resíduo de catalisador exausto de FCC proveniente da refinaria de Sines da Petrogal, é o objeto de estudo deste trabalho.

ORIGEM DO RESÍDUO DE CATALISADOR EXAUSTO DE FCC

O petróleo é uma matéria-prima de origem fóssil que resulta da decomposição de matéria orgânica ao longo do tempo [37]. O petróleo bruto, explorado globalmente, é uma mistura complexa de hidrocarbonetos (compostos orgânicos de carbono e hidrogénio) que por si só tem pouco ou nenhum valor comercial.

A refinação do petróleo bruto em produtos derivados com elevado rendimento energético e interesse comercial (como a gasolina, gasóleo, gás de petróleo liquefeito) é conseguida através da: i) separação física, destilação, das várias frações do petróleo

bruto e ii) na conversão dessas frações em produto final, através de uma sequência de transformações químicas e físicas [37] [38] .

O *cracking* catalítico em leito fluidizado (FCC) é um processo de conversão de algumas frações do petróleo bruto cujo ponto de ebulição está entre os 330-550 °C, em produtos combustíveis com maior valor comercial, como a gasolina e o gás de petróleo líquido [31] [39] [40] . Este processo utiliza um catalisador na forma de pó fino, composto por microesferas com uma dimensão típica na ordem dos 75 µm, que se comporta como um líquido quando fluidizado [31] . Os catalisadores utilizados hoje em dia nas unidades de FCC são tipicamente constituídos por [31] :

i) zeólito-Y, que é um aluminossilicato com estrutura cristalina tridimensional constituída por túneis e cavidades que lhe conferem elevada área superficial (interna e externa) específica. Este constituinte é incluído numa percentagem entre 5-40 por cento

ii) uma matriz ativa composta por alumina

iii) um *filler* de argila

iv) um ligante constituído essencialmente por sílica.

O *filler* e o ligante têm como função fornecer integridade física ao catalisador, proporcionar um meio de transferência de calor e um meio fluidizado no qual o zeólito, material mais caro e mais importante, é incorporado [31] .

A composição química exata do catalisador de FCC adotado numa refinaria, é feita em função do tipo de processo da unidade de FCC e do produto final que se deseja obter [31] .

Durante a atividade química de *cracking* forma-se um resíduo – coque - resultante das reações de degradação e condensação de compostos poliaromáticos insaturados, que se deposita sobre a superfície do catalisador, preenchendo os seus poros e diminuindo a sua atividade catalítica. O catalisador pode ser parcialmente regenerado, através da sublimação do coque, aquecendo-o a uma temperatura entre 640 e os 730 °C [31] . De forma a manter o mesmo nível de atividade catalítica na unidade de FCC, é adicionado catalisador “fresco” ao catalisador regenerado internamente [31] . O catalisador exausto, sem atividade catalítica suficiente, gera um resíduo que é removido da unidade de FCC e enviado, essencialmente, para aterros sanitários [35] [36] .

A ATIVIDADE POZOLÂNICA DO RESIDUO DO CATALISADOR DE FCC

Em 2006 eram utilizadas cerca de 500 mil toneladas de catalisadores de FCC em todo o mundo, das quais 20% em refinarias com unidades de FCC na Europa [35]. Eram geradas, aproximadamente 75 mil toneladas de resíduo de catalisador de FCC na Europa, que se dividem em dois tipos: i) finos de catalisador e ii) catalisador exausto de FCC [35]. Apenas uma pequena porção do resíduo gerado pode ser reutilizado internamente ou vendido a outras refinarias [35] [36]. O restante material tem de ser eliminado, sendo tipicamente conduzido para aterro sanitário, a solução com maior impacto ambiental já que não elimina nem destrói o resíduo. A reutilização deste resíduo noutras indústrias, como na produção de materiais de construção, é uma das soluções estudadas para mitigar o impacto ambiental associado à produção do resíduo de catalisador de FCC [36].

O catalisador exausto de FCC é composto maioritariamente por um aluminossilicato, cuja estrutura descrita anteriormente contribui significativamente para a elevada afinidade deste material para com a água [4]. Quando entra em contacto com uma mistura de cimento e água, o resíduo reage com Ca(OH)_2 (um dos produtos de hidratação do cimento) (Eq. 2.1) formando compostos químicos ligantes, semelhantes aos que se formam durante a reação de hidratação do cimento [4]. Esta reação química designa-se por reação pozolânica (Eq. 2.5) [4]. A atividade pozolânica associada aos resíduos de catalisadores de FCC torna-os passíveis de serem incorporados em materiais de construção à base de cimento.



sendo:

- A/S – a sílica ou o aluminossilicato $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ que é a pozolana
- CH - hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2)
- H - a água (H_2O)
- C-A/S-H - aluminossilicatos de cálcio hidratados

Os diferentes catalisadores de FCC originam resíduos com composições e características distintas, incluindo a atividade pozolânica. É necessário avaliar o comportamento de cada resíduo, com origem em diferentes refinarias, podendo, no

entanto, comparar-se as tendências dos resultados obtidos com a incorporação de diferentes resíduos.

A atividade pozolânica do catalisador exausto de FCC foi comprovada em diversos estudos [4] [5] [6] [7] [8] a sua incorporação, como substituto parcial do cimento, incluindo a do resíduo produzido na refinaria de Sines, em diversos materiais à base de cimento – argamassas de cimento, argamassas de cal, betões - tem-se revelado promissora [4] [9] [10] [11] [12] [13] .

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DO FCC NAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS À BASE DE CIMENTO (MBC)

A trabalhabilidade das argamassas parece ser influenciada diretamente pela incorporação do resíduo, verificando-se tipicamente uma diminuição, explicada pela elevada afinidade do resíduo para com a água [4] . O resíduo de FCC utilizado nestes trabalhos tem um índice de absorção de água de aproximadamente 29% em massa [5]

Os resultados de trabalhos anteriores [4] [9] [10] [11] [12] [13] demonstram que, geralmente, um aumento da percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC conduz a uma diminuição da resistência à flexão, em idades mais jovens de cura. No entanto, deve notar-se que para percentagens de substituição até 15%, a resistência à flexão aos 90 dias de cura é aproximadamente igual à da argamassa de referência sem qualquer teor de resíduo de FCC.

A resistência à compressão tende a aumentar com o aumento do teor de resíduo de FCC nas misturas, em todas as idades de cura, para teores de substituição de cimento até 10 a 15% [4] [10] [11] . Para teores de substituição superiores a 20% estes resultados já não se verificam.

A tensão de aderência, avaliada em argamassas à base de cimento, diminui com o aumento do teor de substituição de FCC por cimento. Os resultados deste ensaio têm um erro significativo, associado à forma de preparação das amostras para realização do ensaio. No entanto, destaca-se o facto de a aderência diminuir significativamente a partir do primeiro incremento de substituição – 5% [10] .

Durante a elaboração desta dissertação não se conseguiu encontrar referências a trabalhos em que tenha sido estudada a substituição parcial de cimento por resíduo de FCC em cimentos-cola, pelo que a sua influência em características como a tensão de aderência não é conhecida. Este trabalho pretende dar continuidade ao estudo

desenvolvido até aqui, no qual tem sido avaliada a viabilidade da substituição parcial de cimento por este resíduo.

No entanto, a influência da substituição parcial de cimento por outro material pozolânico, em cimentos-cola, foi estudada noutros trabalhos [41] [42] . Num dos trabalhos [41] o cimento foi substituído parcialmente por cinzas volantes, até um máximo de 25% de teor de substituição, com incrementos de 5%. Os resultados deste trabalho evidenciaram um decréscimo mais acentuado da tensão de aderência nos cimentos-cola com teor de substituição a cima dos 15 %. Também se verificou uma diminuição da deformação transversal em todos os cimentos-cola com substituição parcial de cimento por cinza volante, sendo que a diminuição mais significativa ocorreu entre o cimento-cola sem substituição e aquele com 5% de teor de substituição. No outro trabalho [42] foi estudada a substituição parcial do cimento por três pozolana artificiais, numa proporção de 16,67% em massa do cimento. A reação pozolânica conduziu, na generalidade, a melhorias na tensão de aderência dos cimentos-cola com as diferentes pozolanas na sua composição, em relação ao cimento-cola sem qualquer pozolana. A deformação transversal também melhorou face à observada para o cimento-cola sem substituição parcial de cimento por pozolanas.

Tendo em conta os resultados dos trabalhos descritos anteriormente, antecipa-se que a substituição parcial de cimento por FCC nos cimentos-cola preparados no âmbito deste trabalho não sofram grandes alterações nas suas propriedades, nomeadamente a tensão de aderência e a deformação transversal, até ao teor de substituição de 12,5%. A partir deste teor de substituição antecipa-se uma diminuição da tensão de aderência, enquanto que os resultados da deformação transversal são difíceis de prever devido à incongruência entre os resultados observados nos diversos trabalhos consultados.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho final de mestrado tem como objetivo principal avaliar os efeitos da substituição parcial de cimento por diferentes teores de resíduo de FCC nas características de cimentos-cola. Essa avaliação é realizada tendo em consideração as normas em vigor a que estes materiais têm que obedecer e por comparação com as características de um cimento-cola comercial.

Para tal foram elaboradas duas séries de cimentos-cola, distintas entre si na composição dos aditivos: a primeira série - que se designou MC_FCC - foi realizada apenas com o aditivo metilcelulose (MC) e a segunda - que se designou MCR_FCC - incluiu metilcelulose e um polímero redispersível (PR) na sua composição. A realização da campanha experimental envolvendo a preparação destas duas séries distintas de cimentos-cola visou alargar o espectro deste estudo uma vez que a série MC_FCC reproduz um cimento-cola normal para utilização interior (secção 2.3) enquanto a série MCR_FCC reproduz um cimento-cola melhorado, com escorregamento reduzido e altamente deformável - C2T S2 - (secção 2.3). O Quadro 3.1 apresenta as composições dos cimentos-cola preparados.

Quadro 3.1 - Composição e nomenclatura dos cimentos-cola preparados para a realização da campanha experimental

Razão ligante/sólidos ¹ (% mássica)	Aditivos (% mássica) [*]		Notação	Ligante (% mássica)			
	Metilcelulose	Resina		Cimento ^{**}	Cimento [*]	FCC ^{**}	FCC [*]
20%	0.25	-	MC_FCC0	100.0	20.0	0.0	0.0
	0.25	-	MC_FCC12,5	87.5	17.5	12.5	2.5
	0.25	-	MC_FCC25	75.0	15.0	25.0	5.0
	0.25	-	MC_FCC37,5	62.5	12.5	37.5	7.5
	0.25	-	MC_FCC50	50.0	10.0	50.0	10.0
35%	0.25	6	MCR_FCC0	100.0	35.0	0.0	0.0
	0.25	6	MCR_FCC12,5	87.5	30.6	12.5	4.4
	0.25	6	MCR_FCC25	75.0	26.3	25.0	8.8
	0.25	6	MCR_FCC37,5	62.5	21.9	37.5	13.1
	0.25	6	MCR_FCC50	50.0	17.5	50.0	17.5

¹: Ligante: cimento + FCC; sólidos: ligante + areia + adjuvantes.

^{*} % percentagem mássica do total de sólidos.

^{**} % percentagem mássica do total de ligantes

Cada série de cimentos-cola (Quadro 3.1) é composta por cinco cimentos-cola com composições que diferem entre si na percentagem de substituição de cimento por FCC.

O teor dessa substituição é expresso em percentagem na notação de cada mistura, por exemplo: para MC_FCC12,5, é substituída 12,5% da massa de cimento por FCC. O primeiro cimento-cola de cada série pretende reproduzir o cimento-cola comercial correspondente produzido pela empresa CIARGA, sendo usados como referência. Pelo facto de na série MC_FCC não ter sido incluído *filler* na composição dos cimentos-cola, a mistura de referência não reproduz exatamente o cimento-cola comercial correspondente. Contudo, permite avaliar o efeito da incorporação do FCC naquele cimento-cola comercial através da comparação com os resultados dos mesmos ensaios para o cimento-cola comercial da CIARGA.

A substituição de cimento por FCC é realizada sucessivamente, em incrementos de 12,5%, até um máximo de 50% da massa de cimento, em ambas a séries.

A caracterização dos materiais constituintes dos cimentos-cola apresentada neste capítulo (secção 3.2) bem como a descrição dos ensaios (secções 3.5.1 a 3.5.6), permitem caracterizar os cimentos-cola preparados no âmbito desta campanha experimental, e compará-los entre si e com o cimento-cola comercial - mistura de referência - através da avaliação dos requisitos de desempenho previstos na NP EN 12004:2007+A1.

A norma NP EN 12004:2007+A1 define os requisitos, a avaliação de conformidade, a classificação e a designação dos adesivos para ladrilhos cerâmicos. Os adesivos são classificados em três tipos, de acordo com a natureza química dos seus ligantes: cimentos-cola, colas em dispersão e colas de resina de reação. No caso do presente trabalho os adesivos são classificados como cimento-cola porque o ligante é um cimento (secção 2.3).

3.2 MATERIAIS

As diferentes composições de cimento-cola preparadas, no decurso da campanha experimental, são compostas pelos seguintes materiais sólidos: cimento tipo CEM I 42,5 R de acordo com a norma NP EN 197-1, FCC, areia siliciosa, *filler* calcário, metilcelulose e polímero redispersível. Todos os materiais, exceto o FCC, foram fornecidos pela CIARGA e armazenados, separadamente, no seu laboratório garantido assim o condicionamento dos mesmos como exigido pelas normas de ensaio, NP EN 12004:2007+A1, durante pelo menos 24 horas antes da realização dos ensaios.

3.2.1. Ligante hidráulico

O ligante hidráulico utilizado na preparação dos diferentes cimentos-cola, previstos no plano da campanha experimental (Quadro 3.1), foi o cimento Portland CEM I 42,5 R produzido e comercializado pela CIMPOR.

O cimento utilizado nesta campanha experimental foi fornecido pela CIMPOR, empresa que o produz e comercializa. O desempenho e características do produto estão em conformidade com os requisitos estabelecidos pela norma EN 197-1:2011. A ficha técnica do cimento CEM I 42,5 R pode ser consultada no anexo A.1.

3.2.2. FCC

O FCC é o material utilizado como substituto parcial do cimento, devido à sua atividade pozolânica, comprovada noutros trabalhos, e já apresentado na secção 2.4.

Este material foi fornecido pela refinaria de Sines da GALP, e a sua composição química é apresentada no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Composição química do FCC [4]

Composto	Composição química (% mássica do FCC)
SiO ₂	39.59
Al ₂ O ₃	52.81
Fe ₂ O ₃	0.55
CaO	0.09
MgO	0.19
SO ₃	0.23
K ₂ O	0.04
Na ₂ O	0.68
Ti ₂ O ₃	0.82
P ₂ O ₅	0.06
Mn ₂ O	0.00
SrO	0.00
Perda ao Fogo	1.49

Na primeira série de cimentos-cola (Quadro 3.1), a razão ligante /sólidos é de 20%, pelo que o teor de cimento é numa proporção máxima e mínima de 20% e 10%, respetivamente, em relação ao total de materiais sólidos. Na segunda série, o cimento é incorporado numa proporção máxima de 35%, diminuindo progressivamente até um

mínimo de 17,5%, em relação ao total de materiais sólidos da mistura. Esta diminuição faz-se pela substituição do cimento por FCC, em incrementos sucessivos de 12,5%, até um máximo de 50% do total de ligante.

3.2.3. Agregado

O agregado utilizado foi uma areia siliciosa, comercializada pela SIBELCO e fornecida pela CIARGA para a realização da campanha experimental, cujas propriedades físicas foram determinadas, no âmbito deste trabalho, no laboratório de materiais de construção do ISEL, seguindo as especificações das normas que se apresentam no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Ensaio realizado para caracterização do agregado utilizado na preparação das misturas

Ensaio	Normas
Análise granulométrica	NP EN 933-1 (2000) NP EN 933-2 (1999)
Massa volúmica e absorção de água	NP EN 1097-6 (2003)
Baridade e volume de vazios	NP EN 1097-3 (2002)

As diferentes razões ligante/sólidos (Quadro 3.1) e a introdução de um polímero redispersível na segunda série de misturas fazem com que a quantidade de areia presente nos cimentos-cola varie da primeira para a segunda série. Concretamente, na série MC_FCC a areia constitui 79,75%, em massa, de todos os constituintes sólidos da mistura enquanto que na série MCR_FCC constitui apenas 58,75%, em massa.

3.2.4. Filler

O *filler* calcário é um material inerte de granulometria fina e foi utilizado para completar a curva granulométrica dos cimentos-cola preparados. Como referido anteriormente (secção 3.1), o *filler* foi incluído apenas nos cimentos-cola da série MCR_FCC, numa proporção de 15% em massa do agregado (areia). A ficha técnica deste material é apresentada no anexo A.2.

3.2.5. Aditivos

De modo a respeitar a propriedade intelectual dos cimentos-cola comerciais que servem de referência neste trabalho, os aditivos serão descritos apenas pela função que desempenham.

Os aditivos utilizados foram uma metilcelulose e um polímero redispersível. A metilcelulose foi o único aditivo incluído na série MC_FCC, enquanto que na série MCR_FCC foram incluídos os dois materiais (Quadro 3.1).

A metilcelulose é um modificador reológico porque é retentor de água, que é adicionado, tanto na primeira como na segunda série de cimentos-cola (Quadro 3.1), na proporção de 0,25%, em massa, do total de materiais sólidos. Na presença deste adjuvante, a água é retida na mistura durante mais tempo, aumentando a água disponível durante a reação de hidratação do cimento. A água retida na mistura atua também como um lubrificante, melhorando a trabalhabilidade do cimento-cola.

A metilcelulose utilizada na produção dos cimentos-cola de ambas as séries é fornecida no estado sólido na forma de pó.

Os polímeros redispersíveis são ligantes orgânicos que conferem flexibilidade ao cimento-cola. O polímero redispersível foi utilizado como aditivo na segunda série, MCR_FCC, na proporção de 6% em massa, do total de materiais sólidos. A incorporação deste material nos cimentos-cola confere resistência à deformação transversal, melhora significativamente a adesividade entre o substrato e a cola bem como, entre a cola e o ladrilho, e melhora a trabalhabilidade da mistura.

O polímero redispersível utilizado na produção dos cimentos-cola da série MCR_FCC é fornecida no estado sólido, em pó.

3.3 PLANO DE ENSAIOS

A calendarização e estruturação do plano de ensaios teve como objetivo a obtenção de resultados de forma rápida e reprodutível. Um dos pressupostos tidos em conta aquando da definição da campanha experimental foi o seu cumprimento no menor tempo necessário, para que no final, e após uma primeira análise e discussão de resultados, houvesse disponibilidade temporal para repetir um determinado ensaio ou complementar ensaios relativos a uma determinada mistura caso os resultados evidenciassem incoerências. No total foram realizados 4 tipos de ensaios distintos, onde foram avaliadas diferentes características dos cimentos-cola. Os 3 ensaios para

determinação da tensão de aderência apenas se distinguem no condicionamento das amostras. A designação dos ensaios, a sua duração e as normas que os descrevem são apresentadas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Designação dos ensaios, identificação das respetivas normas e duração dos mesmos

Ensaio	Norma	Duração
Determinação do escorregamento	EN 1308:1996/A1	(no próprio dia)
Determinação do tempo aberto	EN 1346:1996/A1	27+1 (dias)
Tensão de aderência:		
Inicial	EN 1348+A1	27+1 (dias)
Após imersão em água		7+20(dias)+7+1 (dias)
Após envelhecimento por calor		14+14+1 (dias)
Determinação da deformação transversal	EN 12002	28 (dias)

A reprodutibilidade dos dados obtidos poderia ser comprometida por diferentes condições de temperatura e humidade no laboratório, pelo que a preparação de todas as amostras e a realização dos respetivos ensaios (secções 3.5.1 a 3.5.6), relativos a um cimento-cola, no mesmo dia, foi um dos elementos condicionantes na definição da calendarização.

A capacidade de preparação dos cimentos-cola e também a disponibilidade do laboratório, dos materiais e dos equipamentos necessários ao cumprimento da campanha experimental condicionaram a frequência de preparação das misturas

Os cimentos-cola e as respetivas amostras foram preparadas com uma frequência semanal, proporcionando uma folga temporal, referida atrás, para eventual necessidade de fazer ajustes da calendarização e de forma a garantir a disponibilidade de materiais e equipamentos. As amostras necessárias para a realização de todos os ensaios são preparadas na mesma data e os respetivos ensaios realizados, 28 dias depois, também no mesmo dia. A única exceção é relativa ao ensaio de deslizamento que deve ser realizado logo após a preparação do cimento-cola.

A norma EN 12004:2007+A1 define, os ensaios a realizar e os requisitos exigidos para que um cimento-cola possa obter determinada classificação (secção 2.3). Os cimentos-cola da série MC_FCC reproduzem um cimento-cola para interiores enquanto os da série MCR_FCC reproduzem um cimento-cola melhorado, com escorregamento limitado, tempo aberto alargado e altamente deformável (C 2S2). Assim, embora os ensaios realizados na avaliação das características de ambas as misturas sejam os mesmos, os requisitos exigidos a cada uma não o são (Quadro 3.5).

Quadro 3.5 - Características, requisitos aplicáveis aos cimentos-cola definidos para a realização da campanha experimental de acordo com a norma EN 12004:2007+A1

Série	Classificação do cimento-cola		Característica	Requisito
	Tipo	Classe		
MC_FCC	Anexo ZA.1.1		Tensão de aderência inicial	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$
			Tensão de aderência após imersão em água	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$
MCR_FCC	C	2ETS2	Tensão de aderência inicial	$\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$
			Tensão de aderência após imersão em água	$\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$
			Tensão de aderência após envelhecimento por calor	$\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$
			Tempo aberto (após, no mínimo, 30 min)	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$
			Escorregamento	$\leq 0,5 \text{ mm}$
			Deformação transversal	$\geq 5 \text{ mm}$

3.4 PROCEDIMENTO DE MISTURA DOS CIMENTOS-COLA

Embora as normas de ensaio apresentadas no Quadro 3.5 pressuponham todas o mesmo procedimento de mistura específico, optou-se por adotar o procedimento em vigor na CIARGA, testado e otimizado por vários anos de experiência. Além disso, a adoção do mesmo procedimento de mistura permite a comparação com os resultados de cimentos-cola que a CIARGA comercializa. As alterações ao procedimento prescrito pela norma prendem-se sobretudo com a ordem de mistura dos materiais: no procedimento adotado os materiais secos são colocados primeiro no balde de mistura aos quais é posteriormente adicionada a água. As diferenças entre os dois procedimentos podem ser comparadas através dos esquemas representados na Figura 3.1 e Figura 3.2.

Na prática, a proporção de água a adicionar ao cimento-cola em relação ao total de constituintes sólidos deve seguir as recomendações do fabricante. No caso de ser indicado um conjunto de valores deve ser utilizada a média desse conjunto de valores. Uma vez que a CIARGA na qualidade de fabricante dos cimentos-cola comerciais reproduzidos nesta campanha experimental, e com os quais se pretendem comparar os cimentos-cola com incorporação de FCC, recomenda que a mistura seja realizada com uma proporção de água de 20% em massa foi este teor que se adotou neste estudo.

De acordo com as normas de ensaio aplicáveis (previstas na NP EN 12004:2007+A1) deve ser preparada uma quantidade mínima de 2 kg de cimento-cola, para cada ensaio, numa misturadora do tipo da descrito na norma NP EN 196-1:1994 (secção 4.4), utilizando os seguintes ajustamentos: movimento de rotação de $140 \pm 5 \text{ r/min}$ e movimento planetário de $62 \pm 5 \text{ r/min}$.

O procedimento de mistura descrito nas normas referidas no Quadro 3.5 é o seguinte:

- deitar a água dentro da cuba
- espalhar os constituintes sólidos sobre o líquido
- misturar durante 30 s
- retirar a pá misturadora
- raspar a pá e a cuba durante 1 min
- recolocar a pá e misturar durante 1 min

Deixar a cola repousar de acordo com as instruções do seu fabricante, misturando em seguida por mais 15 s. O procedimento de mistura está esquematicamente representado na Figura 3.1.

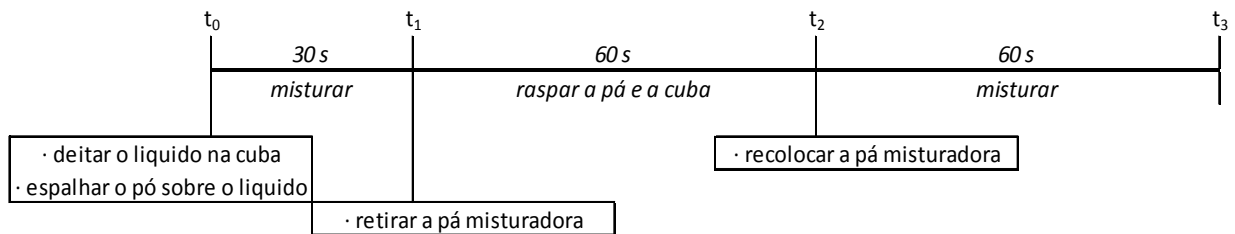


Figura 3.1 - Procedimento de mistura de acordo com as normas de ensaio previstas na EN 12004:2007+A1

Procedimento de mistura empregue pela CIARGA e adotado nesta campanha experimental:

- deitar os constituintes sólidos na cuba (cimento, FCC, agregados, e adjuvantes)
- misturar os componentes sólidos durante 30 s
- adicionar a água
- misturar durante 1 min
- retirar a pá misturadora
- raspar a pá e a cuba durante 1 min
- recolocar a pá e misturar durante 1 min.

Deixar o cimento-cola repousar durante 5 minutos, misturando em seguida por mais 15 s. O procedimento de mistura adotado nesta campanha está esquematicamente representado na Figura 3.2.

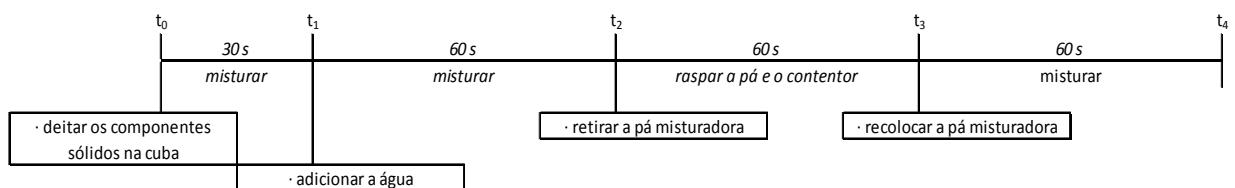


Figura 3.2 - Procedimento de mistura adotado na realização da campanha experimental

3.5 ENSAIOS

Condições de ensaio

Os ensaios (Quadro 3.4) foram realizados sob condições de temperatura e humidade constantes para assegurar a reprodutibilidade dos ensaios. A norma EN 12004 define como sendo condições normalizadas: temperatura (23 ± 2) °C, humidade relativa (50 ± 5) % e a circulação de ar inferior a 0,2 m/s, condições estas que foram asseguradas durante toda a campanha experimental

3.5.1 Determinação da Resistência à Tração De Cimentos-Cola

O procedimento de ensaio para determinação da resistência à tração descrito na norma europeia NP EN 1348:2000 [43] aplica-se a todos os cimentos-cola e cimentos-cola com componentes separados para aplicações interiores e exteriores de ladrilhos cerâmicos em paramentos verticais e horizontais (paredes e pavimentos).

O ensaio consiste, basicamente, em tracionar as peças metálicas coladas a um ladrilho, (elemento de ligação à prensa) que por sua vez está ligado ao suporte pelo cimento-cola a ensaiar até que o ladrilho se destaque do suporte.

Materiais de ensaio

Os materiais utilizados na preparação dos cimentos-cola foram condicionados durante, pelo menos, 24 horas sob as condições normalizadas de temperatura e humidade, garantidas pelo laboratório da CIARGA.

Os ladrilhos foram verificados antes do seu condicionamento de forma a garantir que estavam limpos e secos e que eram do tipo V1 (norma EN 176).

A conformidade da placa de cimento com as especificações da norma EN 1323, que define as dimensões e o material que as constitui, também foi confirmada. As placas de cimento são o substrato sobre o qual serão aplicados os cimentos-cola e os ladrilhos.

Os equipamentos e utensílios utilizados na realização deste ensaio são os constantes no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Materiais, equipamentos e utensílios utilizados na preparação das amostras e execução dos ensaios referidos no Quadro 3.4 (descritos nas normas EN 1348 e EN 1346)

Aparelhos e utensílios

Ladrilhos cerâmicos (50 ± 1) mm x (50 ± 1) mm
Placa de cimento
Peso - 2 Kg
Placas de tração (50 ± 1) mm x (50 ± 1) mm e_{min} 10 mm
Misturadora elétrica: SIEMENS
Equipamento de ensaio de tração: HOYTOM 07M6498.1
Estufa ventilada: FITOCLIMA 600
Taloça de bordo liso
Taloça dentada (entalhes 6 mm x 6 mm)

Preparação das amostras de ensaio

Foi aplicada sobre a placa de cimento uma camada fina de cimento-cola, que se pretende testar, com uma taloça de bordo liso.

Em seguida aplicou-se uma camada mais espessa que que foi penteada com a taloça dentada.

A taloça foi mantida num ângulo aproximado de 60° com o substrato, neste caso a primeira camada de cimento-cola, fazendo um ângulo reto com um dos bordos da placa e passada ao longo da placa paralelamente a esse bordo (numa linha reta). Na Figura 3.3 é visível aspeto final das placas de cimento após a aplicação das duas camadas de cimento-cola.



Figura 3.3 - Aspeto da placa de cimento após aplicação da camada de cimento-cola talochada na preparação da amostra para o ensaio de resistência à tração

Após 5 minutos aplicaram-se 10 ladrilhos sobre a cola a uma distância de 50 mm do bordo e é aplicada uma força de $20 \pm 0,05$ N durante 30 s. Na Figura 3.4 é visível a distribuição dos ladrilhos na placa e a aplicação do peso.

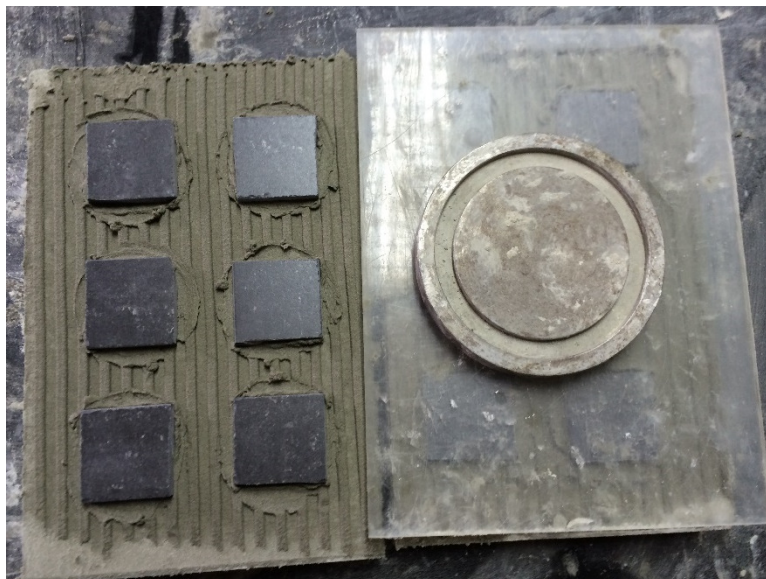


Figura 3.4 - Aspeto da placa com os ladrilhos aplicados e com o peso sobre os ladrilhos acabados de aplicar

3.5.1.1 Aderência com cura normal

As amostras de ensaio foram preparadas segundo o procedimento descrito em 3.5.1.1.

Após 27 dias de armazenagem em condições normalizadas, colaram-se as placas de tração aos ladrilhos com uma cola adequada de alta resistência (resina epoxy). Neste trabalho usou-se a cola EPOXY RESIN da WEST SYSTEM.

Após mais 24 horas de armazenagem em condições normalizadas, foi determinada a resistência à tração do cimento-cola aplicando uma força de tração a velocidade constante de (250 ± 50) N/s a cada ladrilho, recorrendo ao equipamento de ensaio de tração (Quadro 3.6) apresentado na Figura 3.5.

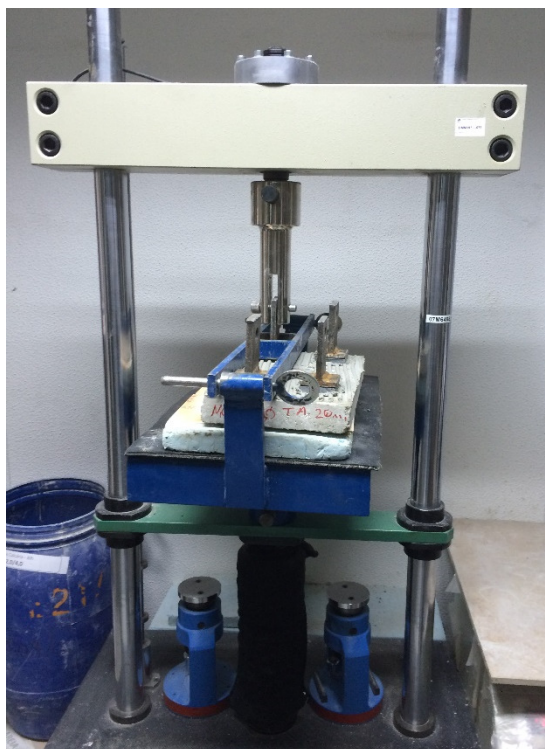


Figura 3.5 - Equipamento de ensaio de tração: HOYTOM 07M6498.1

Avaliação e expressão dos resultados

A tensão de aderência avaliada em cada ladrilho foi determinada com uma exatidão de 0,1 N/mm² utilizando a Equação 3.1.

$$A_s = L / A \quad (\text{Equação 3.2})$$

em que:

A_s é a tensão de aderência, em N/mm²;

L é a força total lida no equipamento, em Newton;

A é a área de colagem, em milímetros quadrados (2500 mm²)

A tensão de aderência do cimentos-cola em análise foi determinada da seguinte forma:

- determinou-se a média de dos valores de resistência individual obtidos com as dez amostras preparadas
- retirou-se os valores que se encontravam fora do intervalo de $\pm 20\%$ do valor médio
- no caso de restarem cinco ou mais valores, determinou-se uma nova média
- no caso de não restarem pelo menos cinco valores, repetiu-se o ensaio
- avaliou-se visualmente o modo de rotura dos provetes (EN 1322) (secção 3.5.2).

Os resultados de tensão de aderência dos cimentos-cola testados após imersão das amostras em água, após o envelhecimento das amostras por aquecimento e de tempo aberto (descritos nas secções 3.5.1.2, 3.5.1.3, 3.5.1.4 e 3.5.4) foram determinados da mesma forma.

3.5.1.2 Aderência após imersão em água

As amostras de ensaio foram preparadas segundo o procedimento descrito na secção 3.5.1.1.

Posteriormente, as amostras foram condicionadas em condições normalizadas durante 7 dias (tal como se fez no ensaio de determinação da tensão de aderência inicial) e em seguida mergulhadas em água a temperatura normalizada, como é visível na Figura 3.6.



Figura 3.6 - placas imersas em água

As amostras foram mantidas dentro de água durante 20 dias. Findo esse período, foram retiradas e os ladrilhos enxaguados com um pano e coladas as placas de tração aos ladrilhos. Após 7 horas, voltaram a ser colocadas dentro de água a temperatura normalizada.

No dia seguinte as amostras foram retiradas da água e realizaram-se imediatamente os ensaios de tração segundo o procedimento descrito na secção 3.5.1.2 sendo os resultados da tensão de aderência também determinados na mesma forma.

3.5.1.3 Aderência após envelhecimento por aquecimento

As amostras de ensaio foram preparadas segundo o procedimento descrito na secção 3.5.1.1.

As amostras foram mantidas, durante 14 dias, em condições normalizadas e após esse período colocadas numa estufa ventilada à temperatura de 70 ± 2 °C durante mais 14 dias. As amostras foram depois retiradas da estufa e coladas as placas de tração aos ladrilhos.

As amostras foram recolocadas na estufa durante mais 24 horas. No dia seguinte as amostras foram retiradas da estufa e ensaiadas para determinar a resistência à tração como descrito para o ensaio de aderência inicial (secção 3.5.1.2).

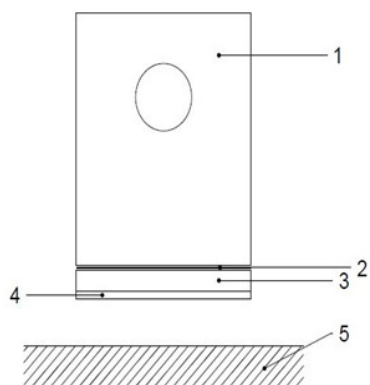
3.5.2 Tipologias de rotura nos ensaios de ensaios de aderência

O ensaio de determinação da tensão de aderência de cimentos-cola permite para além da determinação do valor da tensão de rotura em si, como se viu atrás (secção 3.5.1), a avaliação visual da tipologia de rotura. Desta forma obtém-se uma caracterização mais completa, quantitativa e qualitativa, da aderência promovida pelo cimento-cola entre o sistema de revestimento e o suporte.

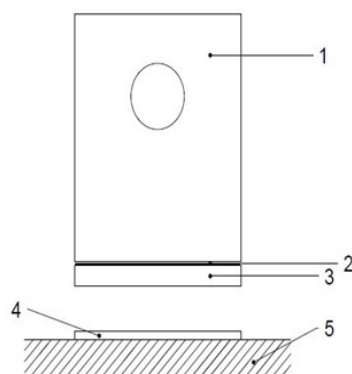
A Figura 3.7 reproduz a representação das diferentes tipologias de rotura possíveis e a sua nomenclatura, de acordo com a classificação incluída na norma EN 12004:2007+A1. Basicamente são distinguidos dois tipos de rotura principais:

- adesiva (A) se ocorre nas interfaces entre o ladrilho e o cimento-cola (AF-T); entre o cimento e o substrato (AF-S); e ainda entre o ladrilho e a peça metálica (BS)
- coesiva (C) se a rotura ocorre no seio de um dos componentes do conjunto: ladrilho (CF-T); cimento-cola (CF-A); e do substrato (CF-S).

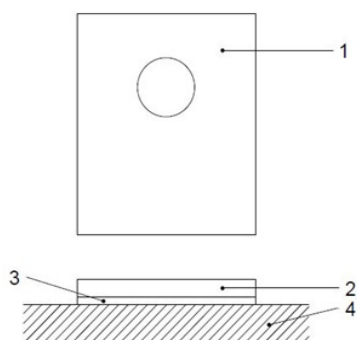
1- Peça metálica para ligação à máquina de ensaios; 2- Cola epoxy; 3- Ladrilho; 4- Cimento-cola; 5- Suporte (placa de cimento)



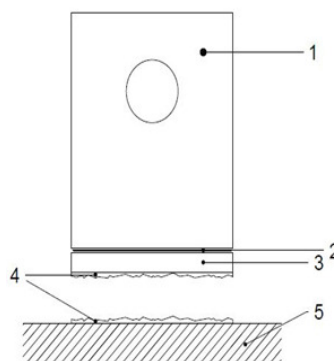
a) AF-S - Falha adesiva entre o ladrilho e o suporte



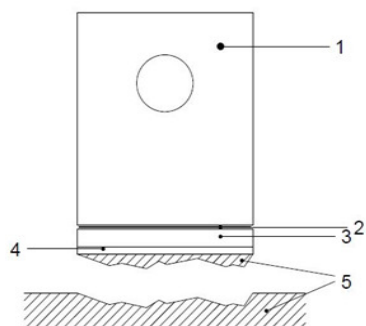
b) AF-T - Falha adesiva entre o ladrilho e o cimento-cola



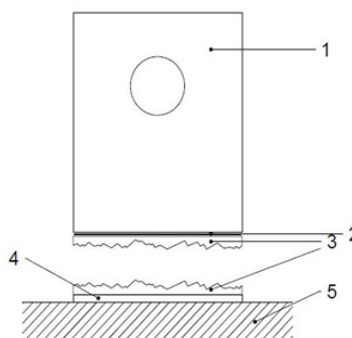
c) BT - Falha adesiva entre o ladrilho e a peça metálica



d) CF-A - Falha coesiva do cimento-cola



e) CF-S - Falha coesiva do suporte



f) CF-T - Falha coesiva do ladrilho

Figura 3.7 - Representação esquemática das tipologias de rotura nos ensaios de aderência e respetiva nomenclatura de acordo com a norma EN 12004:2007+A1

3.5.3 Capacidade de transferência do cimento-cola para o ladrilho

A norma EN 1347 [44] define a molhabilidade de um cimento-cola como sendo a capacidade que o cimento-cola talochado, no estado fresco, tem de molhar um vidro. De forma análoga, a “capacidade de transferência” é a capacidade do cimento-cola “talochado” no estado fresco de se transferir, i.e., de ficar “agarrado” ao vidro (neste TFM foram utilizados ladrilhos no lugar dos vidros previstos na norma e avaliou-se apenas a capacidade de transferência). A avaliação destas características constitui um meio complementar de caracterização da eficiência da aderência que o cimento-cola desenvolve. A avaliação da área de transferência de adesivo, neste caso cimento-cola, para o ladrilho depois de este ter sido aplicado e posteriormente removido em diversos tempos de secagem i.e, em função do tempo de cura dá uma estimativa da perda de adesão devida ao processo de endurecimento.

Não existem requisitos normativos em relação à avaliação destas características. Contudo, a norma EN 12004 prevê a possibilidade da realização de um ensaio para a avaliação da molhabilidade (de acordo com o procedimento descrito na norma EN 1347) mesmo que não seja requerido pelas especificações para o produto. Neste caso, o fabricante declara os valores obtidos para complementar a informação fornecida sobre o cimento-cola.

No âmbito deste TFM realizou-se um ensaio de avaliação da capacidade de transferência dos cimentos-cola de ambas as séries preparadas, MC_FCC e MCR_FCC, para os ladrilhos seguindo o procedimento de ensaio interno na empresa CIARGA, que se descreve abaixo.

Materiais de ensaio

Os materiais utilizados na realização deste ensaio foram os mesmos utilizados nos ensaios de determinação da tensão de aderência e constantes no Quadro 3.6.

Preparação das amostras de ensaio

A preparação das amostras de ensaio seguiu o mesmo procedimento descrito para os ensaios de determinação da tensão de aderência (secção 3.5.1.1), até à aplicação do cimento-cola sobre as placas de cimento incluindo a etapa da utilização das talochas lisa e dentada (Figura 3.3). Aplicado o cimento-cola sobre o suporte, foram colocados, sucessivamente, 6 ladrilhos em cima do cimento-cola cada um após um período de 10 minutos i.e, os ladrilhos foram aplicados 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos após a aplicação do cimento-cola, e removidos, cada um, 10 minutos depois de colocados em cima do

cimento-cola. Os ladrilhos foram sujeitos a uma força de $(20 \pm 0,05)$ N durante 30 s aquando da sua aplicação sobre o cimento-cola.

Avaliação e expressão dos resultados

A determinação da área do ladrilho para a qual ocorreu transferência de cimento-cola foi realizada recorrendo a ferramentas gráficas da seguinte forma:

- Em primeiro lugar foram tiradas fotografias a cada ladrilho para o qual se pretende fazer esta avaliação
- A fotografia da superfície de 25 mm^2 ($5 \times 5 \text{ mm}$) de cada ladrilho foi então dividida em 100 quadrados utilizando uma matriz de 10×10 linhas horizontais e verticais equidistantes.

Por fim, por avaliação visual, determinaram-se os quadrados da matriz que tinham cimento-cola “agarrado” e estimou-se a área do ladrilho para a qual ocorreu transferência do cimento-cola. O resultado da transferência é expresso em percentagem da área do ladrilho coberta pelo cimento-cola.

3.5.4 Determinação do Tempo Aberto

O tempo aberto define-se como o máximo intervalo de tempo entre a aplicação da cola sobre o substrato e a aplicação dos ladrilhos, para o qual a tensão de aderência cumpre os requisitos aplicáveis da norma EN 12004, $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ (Quadro 3.5). O ensaio é realizado de acordo com a norma EN 1346:1996/A1 [45]

Materiais de ensaio

O ensaio para determinação do tempo aberto é em tudo idêntico ao ensaio descrito anteriormente na secção 3.5.1 para determinação da resistência à tração, com exceção do tempo de espera para colocação dos ladrilhos. Os materiais, equipamentos e utensílios utilizados na realização deste ensaio foram por isso os mesmos utilizados no ensaio anterior – NP EN 1348:2000 – e constantes no Quadro 3.6.

Preparação das amostras de ensaio

A preparação das amostras de ensaio seguiu o mesmo procedimento descrito para os ensaios na secção 3.5.1.2, até ao momento da aplicação dos ladrilhos. A diferença é que neste caso, os ladrilhos foram aplicados, sobre o cimento-cola, após 20 e 30 minutos, afastados 50 mm tal como no outro ensaio e foi-lhes também aplicada uma força de $20 \pm 0,05 \text{ N}$ durante 30 s.

Depois, tal como no ensaio de determinação da tensão de aderência com cura normal (secção 3.5.1.2), após 27 dias de armazenagem em condições normalizadas, foram coladas as placas de tração aos ladrilhos com a mesma cola de alta resistência (resina epoxy).

Após mais 24 horas de armazenagem em condições normalizadas, as amostras foram ensaiadas e determinada a resistência do cimento-cola à tração através da aplicação de uma força de $250 \pm 50 \text{ N/s}$ a velocidade constante.

Avaliação e expressão dos resultados

A avaliação e expressão de resultados foi realizada da mesma forma que para os ensaios descritos anteriormente, na secção 3.5.1.

3.5.5 Determinação do Escorregamento

O ensaio de escorregamento, descrito na norma EN 1308:1996/A1 [46] tem como objetivo determinar a resistência de uma cola ao escorregamento de um ladrilho cerâmico, quando aplicado num paramento vertical. Uma cola tem resistência ao deslizamento se o deslocamento do ladrilho na vertical, durante um intervalo de tempo definido, for inferior 0,5 mm que é o valor imposto pela norma de ensaio EN 1308:1996 (Quadro 3.5).

Materiais de ensaio

Ladrilhos – para o ensaio de deslizamento foram utilizados ladrilhos quadrados com dimensões 100 ± 1 mm x 100 ± 1 mm e sujeitos às mesmas verificações de conformidade que os ladrilhos utilizados nos ensaios anteriores (secção 3.5.1).

Placa de cimento – os requisitos são os mesmos das placas de cimentos utilizadas nos ensaios anteriores (secção 3.5.1).

Equipamentos e utensílios

Fita adesiva com 25 mm de largura;

Peso – massa capaz de exercer uma força de $50 \pm 0,1$ N com área de secção quadrada transversal inferior a 100 ± 1 x 100 ± 1 mm.

Paquímetro com precisão de 0,01 mm.

Procedimento

Com a placa de cimento deitada e colocada sobre o lado de maior comprimento, colou-se uma tira de fita adesiva e aplicou-se sobre a placa de cimento uma camada fina de cimento-cola com uma talocha de bordo liso.

Em seguida aplicou-se uma camada mais espessa de cola até à fita adesiva, de forma a que o cimento-cola se sobrepusesse ligeiramente à extremidade da fita, e penteou-se essa camada com a talocha dentada. A talocha foi mantida num ângulo aproximado de 60° com o substrato, fazendo um ângulo reto com um dos bordos da placa e foi passada ao longo da placa paralelamente a esse bordo (numa linha reta).

Removeu-se imediatamente a fita adesiva e passados dois minutos, colaram-se dois ladrilhos junto ao limite da fita adesiva e foi aplicada uma força de $30 \pm 0,5$ N durante 30 ± 5 s.

Mediu-se a distância entre o bordo da placa de cimento e o ladrilho com o paquímetro. Imediatamente a seguir e cuidadosamente, ergue-se a placa de cimento até à posição vertical, como se apresenta na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Placa de cimento, na vertical, após a aplicação dos ladrilhos e remoção da fita adesiva, para determinação do escorregamento

Após 20 ± 2 minutos mediu-se novamente a distância, no ponto de maior afastamento do ladrilho em relação ao bordo da placa de cimento.

O escorregamento máximo do ladrilho, provocado pelo seu peso próprio, corresponde à diferença entre as duas distâncias medidas na vertical. O ensaio deve ser realizado em 2 ladrilhos e os valores das medições, bem como o resultado do escorregamento que corresponde à média dos valores obtidos com os dois ladrilhos, devem ser apresentados em milímetros.

3.5.6 Determinação da Deformação Transversal

O ensaio de determinação da deformação transversal está descrito na norma EN 12002 [47] e tem como finalidade medir a deformabilidade de um cimento-cola mediante a aplicação de uma carga a uma amostra de dimensões padrão. O ensaio consiste, basicamente, em colocar a amostra sobre as duas extremidades de um suporte e posteriormente aplicar uma carga, crescente, no centro da amostra até que a mesma entre em rotura.

Materiais de ensaio

A preparação da amostra a ser ensaiada exigiu a utilização de material dedicado a este tipo de ensaios: molde metálico com dimensões $280 \pm 1 \times 45 \pm 1$ mm (Figura 3.9) e uma cunha metálica com dimensões $300 \times 45 \times 3$ mm (Figura 3.10). Foi também necessário um filme plástico, sobre o qual se preparou a amostra de ensaio e que facilitou o seu manuseamento e movimentação.

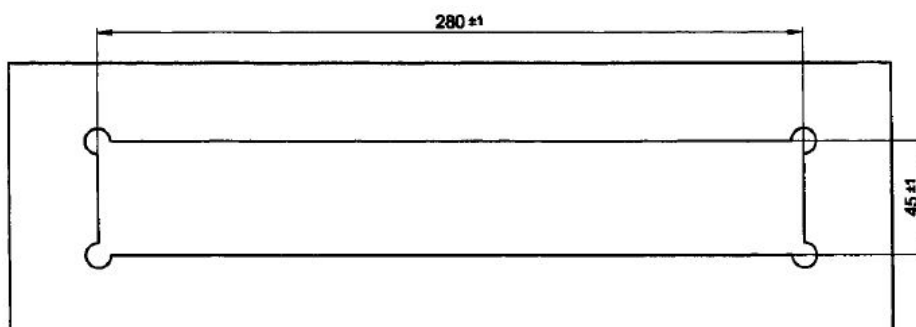


Figura 3.9 - Molde metálico que garante a produção da amostra com as dimensões requeridas

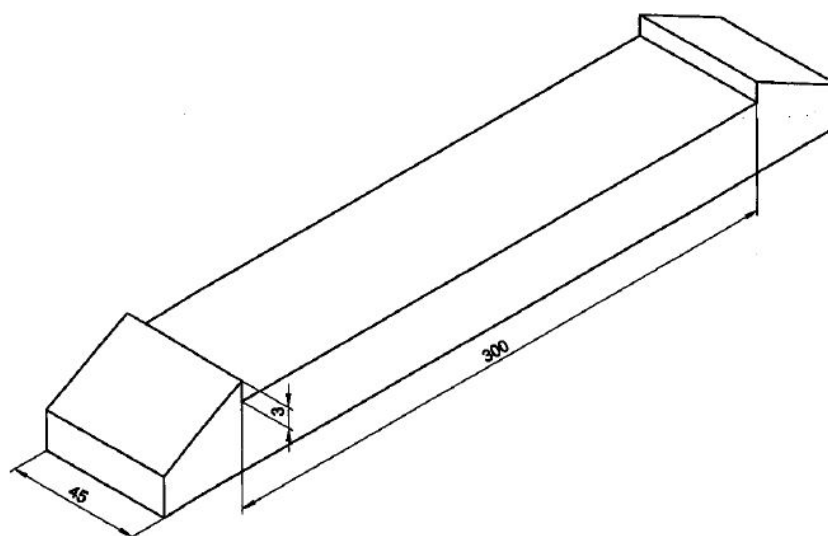


Figura 3.10 - Cunha metálica

A realização do ensaio pressupõe a utilização de material adicional, esquematizado na Figura 3.11 e reproduzido fotografia da Figura 3.12 na , e que, em conjunto com a prensa utilizada nos ensaios anteriores (secções 3.5.1.2 a 3.5.1.4 e 3.5.4), permitirá aplicar a carga à amostra produzida de forma padronizada: uma base na qual a amostra fique assente em dois pontos, e um acessório que, ligado à prensa, aplique a carga num terceiro ponto no centro da amostra onde será realizada a leitura da deformação transversal a que a amostra foi sujeita.

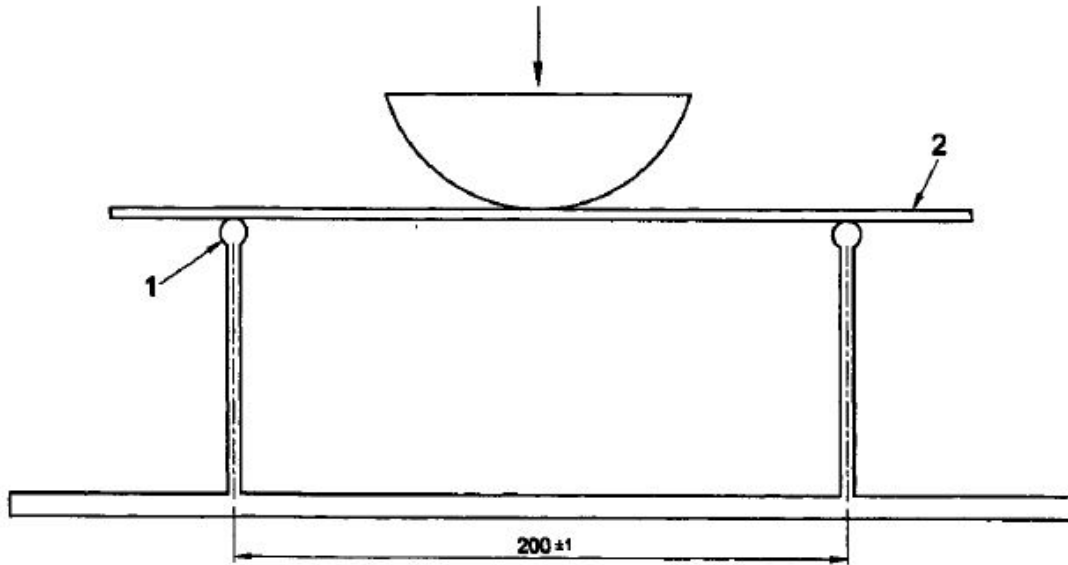


Figura 3.11 - Esquema, em vista, do equipamento para realização do ensaio de deformação transversal; (1) suporte, (2) amostra.



Figura 3.12 - Equipamento e amostra utilizados no ensaio de determinação da deformação transversal

Procedimento

O objeto deste ensaio é uma amostra de dimensões padrão produzida da seguinte forma:

Preparação do suporte:

- colocou-se um filme plástico, com 0.15 mm de espessura, sobre uma superfície rígida garantindo que o filme plástico ficava esticado, sem pregas ou rugas.

Preparação da amostra:

- posicionou-se firmemente o molde metálico esquematizado na Figura 3.9 sobre o filme plástico

- recorrendo a uma talocha de bordo liso, aplicou-se o cimento-cola sobre o molde de forma a que este preenchesse totalmente o espaço vazio do molde. A amostra foi firmemente compactada com a talocha de bordo liso, com o objetivo de remover o ar no seu interior

- removeu-se o molde metálico esquematizado na Figura 3.9, num movimento vertical, de forma a que a amostra permanecesse intacta sobre o suporte

- posicionou-se a cunha metálica esquematizada na Figura 3.10 sobre a amostra, que foi carregada com um peso exercendo uma força de 100 ± 1 N. A pressão aplicada garantiu que a amostra preenchesse o espaço vazio do molde metálico esquematizado na e assegurou a espessura requerida da mesma (3mm). Removeu-se o cimento-cola em excesso que fluía pelas laterais do molde e uma hora depois removeu-se o peso e o molde.

Ensaio:

- a amostra foi condicionada a 23 ± 2 °C durante 28 dias

- ao 28º dia, a amostra foi colocada e centrada, sobre o suporte metálico tal como esquematizado na Figura 3.11

- deformou-se a amostra, carregando-a verticalmente com uma bigorna, à velocidade de 2mm/min até que ocorresse a rotura

- registou-se a deformação em relação ao plano horizontal no centro da amostra, em mm, lida no computador que controla o equipamento de ensaio.

Análise e expressão de resultados

O resultado da deformação transversal é dado pela média aritmética das deformações registadas de 3 amostras, e expresso em mm.

4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados na campanha experimental definida para este trabalho (Capítulo 3), em relação a todos os cimentos-cola preparados (Quadro 3.1). O capítulo apresenta, ainda, a análise crítica dos resultados obtidos:

- com os cimentos-cola de cada série preparada, de forma a avaliar o efeito da substituição parcial de cimento por FCC nas diferentes propriedades avaliadas (Quadro 3.5)
- com os resultados de outros trabalhos científicos obtidos em cimentos-cola com pozolanas, disponibilizados na bibliografia da especialidade
- à luz dos requisitos estabelecidos na norma EN 12004
- com a série MC_FCC em relação aos resultados obtidos com o cimentos-cola do mesmo tipo para utilização interior, sem características especiais ou adicionais comercializados pela empresa CIARGA.

Os resultados experimentais obtidos com cada uma das séries de cimentos-cola são analisados de forma independente, não existindo interesse em compará-los entre si por se tratarem de cimentos-cola com composições diferentes e, conseqüentemente, com requisitos normativos também diferentes (Quadro 2.3)

Além disto, os resultados experimentais são apresentados em quadros e gráficos concebidos coerentemente, tanto no conteúdo como na forma, para a sua leitura ser mais intuitiva e fluida. Com este propósito, os resultados de ambas as séries de cimentos-cola são apresentados com graduações diferentes da mesma cor de forma a representar o teor de resíduo de FCC (quanto mais escura a cor maior o teor de resíduo incorporado na composição do cimento-cola).

4.2. SÉRIE DE CIMENTOS-COLA MC_FCC

Os cimentos-cola da série que se designou MC_FCC são constituídos por cimento, FCC, metilcelulose, areia siliciosa e água (Quadro 3.1). Estes cimentos-cola são preparados a partir do cimento-cola MC_FCC0 com substituição parcial entre 12,5 e 50% (em massa) de cimento por FCC, com incremento 12,5%.

Os cimentos-cola da série MC_FCC têm uma composição comparável com a composição do cimento-cola comercial normal que a empresa CIARGA, S.A. comercializa para utilização interior, sem características especiais ou adicionais, como especificado no anexo ZA da norma EN 12004. Contudo, os cimentos-cola da série MC_FCC não incluíram a fração 0/0,1 mm do *filler* calcário presente no cimento-cola comercial. Neste cimento-cola comercial a fração 0/0,1 mm do *filler* corresponde a, cerca, de 25% do teor total de agregados (i.e, cerca de 20%, em massa, da composição total). Por isto, o MC_FCC0 não reproduz exatamente o cimento comercial normal. A ausência desta fração de *filler* deve traduzir-se numa alteração dos valores dos resultados obtidos nas propriedades avaliadas em relação aos resultados obtidos pelo laboratório da CIARGA para o cimento-cola comercial normal, pelo que os resultados serão também analisados em função dessa diferença de resultados.

Tal como já se disse anteriormente, os cimentos-cola para utilização interior sem características especiais ou adicionais - como os da série MC_FCC – para serem comercializados (de acordo com o anexo ZA da norma EN 12004) têm de satisfazer, apenas, os requisitos apresentados no Quadro 3.5 (secção 3.3). No entanto, para obter um conhecimento mais aprofundado do efeito do FCC neste tipo de cimentos-cola foram realizados também os ensaios de determinação da tensão de aderência após tempo aberto (20 e 30 minutos), após ação do calor e o ensaio de resistência ao escorregamento. Isto significa que foram realizados os mesmos ensaios que os realizados para a série de cimentos-cola com inclusão de resina (polímero redispersível) – série MCR_FCC (secção 3.3) – exceto o da deformação transversal, que só se realiza para cimentos-cola da série MCR_FCC porque os cimentos-cola sem resinas não apresentam resistência à deformação transversal mensurável. De facto, a realização de uma campanha experimental mais extensa fornece uma maior quantidade de resultados que serão úteis na análise da influência dos diferentes teores de substituição de cimento por FCC nas propriedades dos cimentos-cola.

4.2.1. TENSÃO DE ADERÊNCIA

Os ensaios de determinação da resistência à tração, descritos na norma NP EN 1348, foram usados para avaliar a tensão de aderência dos cimentos-cola sujeitos a diferentes tipos de cura e diferentes intervalos de tempos de aplicação do ladrilho no cimento-cola. Em concreto, determinaram-se as tensões de aderência:

- correspondente ao processo de cura normal (secção 3.5.1) que se abreviou por “28d cn”

- após imersão em água: 7 dias de cura normal + 21 dias de cura em água (secção 3.5.1) que se abreviou por “7d cn+21d ca”
- após envelhecimento por calor: 14 dias de cura normal + 14 dias de cura ao calor + 1 dia de cura normal (secção 3.5.1) que se abreviou por “14d cn + 14d cc + 1d cn”
- após um “tempo aberto”: cura normal e aplicação dos ladrilhos diferida 20 e 30 minutos da aplicação do cimento-cola (secção 3.5.2). que se abreviou por “TA 20 min” e “TA 30 min”, respetivamente.

O ensaio de determinação da tensão de aderência consiste na aplicação de uma força de tração a uma peça metálica, previamente colada a um ladrilho, até que o ladrilho se destaque do substrato ao qual foi colado com o cimento-cola que se está a testar (secção 3.5.1).

O Quadro 4.1 e a Figura 4.1 apresentam os resultados da tensão de aderência, e os respetivos desvios-padrão, obtidos com os cimentos-cola da série MC_FCC. O Quadro 4.1 apresenta também os resultados que se obtiveram o cimento-cola para utilização interior, sem características especiais ou adicionais comercializados pela empresa CIARGA (CCC-CIARGA). A linha horizontal representada na Figura 4.1 indica o valor que a norma impõe como requisito para este tipo de cimento-cola em relação aos resultados obtidos nos ensaios de aderência inicial e aderência após imersão em água.

Como referido atrás (secção 3.5.1), para a avaliação dos valores da tensão de aderência foram preparadas 10 amostras. Os resultados dos ensaios são apresentados de forma completa nas fichas respeitantes a cada cimento-cola e incluídos em anexo (Anexo B). De acordo com as instruções normativas (NP EN 1348) os valores superiores e inferiores a 20% do valor da média devem ser excluídos. Uma vez que os resultados destes ensaios apresentam uma elevada dispersão, o número de resultados, de facto, considerados na determinação do valor médio foram inferiores como se apresenta, também, nas colunas correspondente ao número de amostras (n) do Quadro 4.1. Os resultados obtidos a partir da média de 2 ou 3 valores (que se encontram marcados com um asterisco na Figura 4.1) devem ser analisados com a devida prudência.

Quadro 4.1 - Resultados da tensão de aderência obtidos com os cimentos-cola da série MC_FCC.

		MC_FCC0	n	MC_FCC12.5	n	MC_FCC25	n	MC_FCC37.5	n	MC_FCC50	n	CCC-CIARGA
Tensão de Aderência [N/mm²]												
28d cn		0.33	6	0.36	5	0.23	5	0.21	6	0.17	9	0.71
7d cn + 21d ca		0.54	4	0.58	10	0.51	8	0.37	7	0.15	6	1.15
14d cn + 14d cc + 1d cn		0.09	6	0.08	5	0.03	2	0.05	3	0.02	2	-
Tempo aberto	20 min	0.29	2	0.37	8	0.32	6	0.32	8	0.26	8	0.79
	30 min	0.35	8	0.45	8	0.31	7	0.29	5	0.20	8	-

Legenda: n - nº de amostras utilizadas no cálculo da média; d - dias; cn - cura normal; ca - cura em água; cc - cura ao calor 70°C; CCC-CIARGA - cimento-cola comercial da CIARGA

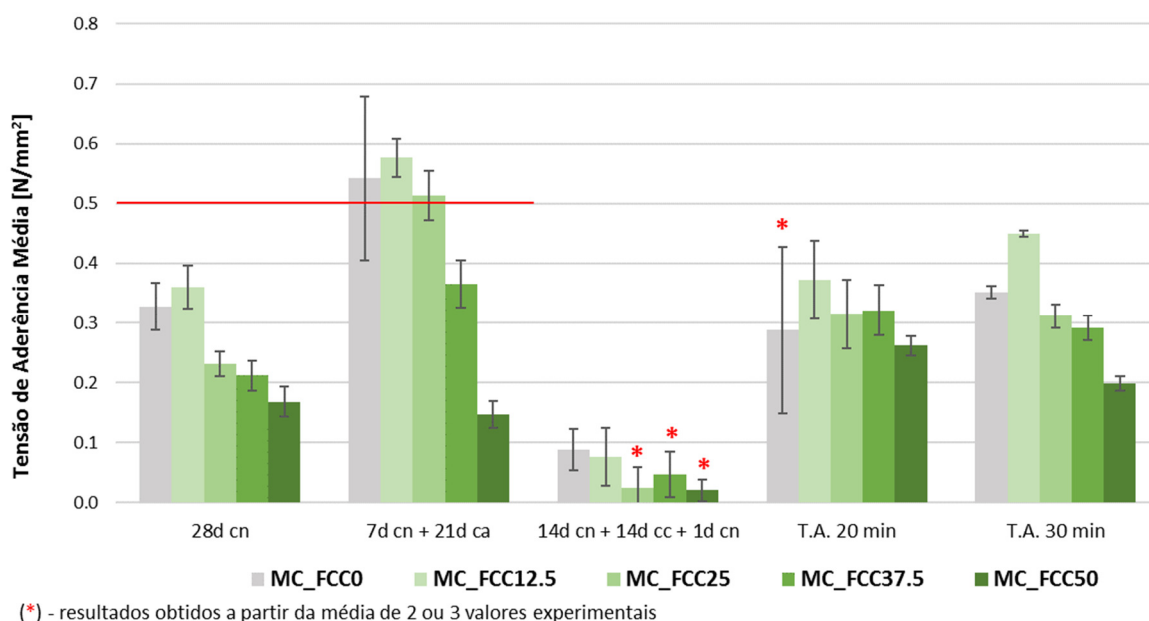


Figura 4.1 - Apresentação gráfica dos resultados (e respectivos desvios padrão) da tensão de aderência, obtidos com os cimentos-cola da série MC_FCC. A linha a vermelho indica os requisitos mínimos, impostos pela norma NP EN 12004, para um cimento-cola do tipo reproduzido pela série MC_FCC

TENSÃO DE ADERÊNCIA COM CURA NORMAL

A partir da análise dos resultados apresentados no Quadro 4.1 e na Figura 4.1 verifica-se que o cimento-cola MC_FCC12.5, submetido a cura normal, apresenta um valor de tensão de aderência inicial superior ao da mistura de referência sem incorporação de FCC, MC_FCC0. Este aumento da tensão de aderência poderá ser explicado pela atividade pozolânica do FCC e a consequente formação de produtos cimentícios adicionais [4].

Os restantes cimentos-cola, com percentagens mais elevadas de substituição de cimento por FCC (entre 25 e 50%), apresentam valores de tensão de aderência que seguem uma tendência decrescente à medida que aumenta o teor de incorporação de FCC no cimento-cola. Esta tendência poderá ser explicada: i) pela diminuição da trabalhabilidade da mistura, resultante da absorção de água pelo resíduo de FCC, que torna o cimento-cola mais poroso [4] e ii) pela mitigação de Ca(OH)_2 disponível, devido à diminuição da fração mássica de cimento, que condiciona a extensão da reação pozolânica.

Como já foi dito na secção 4.2, os cimentos-cola da série MC_FCC não incluem *filler* na sua composição, ao contrário do cimento-cola comercializado pela CIARGA, pelo que, como seria expectável, os resultados obtidos com MC_FCC0 (submetido a cura normal) e os resultados do CCC-CIARGA são diferentes. De facto, a tensão de aderência determinada para MC_FCC0, cimento-cola de referência, é inferior à tensão de aderência do cimento-cola comercial. Constata-se que pelo facto de não incluírem *filler* na sua composição, os cimentos-cola da série MC_FCC0 têm tensão de aderência 0.38 N/mm^2 ($0.71-0.33$) inferior à que teriam se se tivesse incluído o *filler*. Contudo, uma vez que o *filler* é um material inerte, espera-se que esta alteração afete todos os cimentos-cola da série MC_FCC submetidos a cura normal basicamente da mesma maneira pelo que se pode esperar que se lhes tivesse sido incluído o *filler* a suas tensões de aderência aumentassem cerca de 0.38 N/mm^2 .

Como já se disse atrás (secção 3.3) a norma EN NP 12004 exige que a tensão de aderência dos cimentos-cola do tipo reproduzido na série MC_FCC, sujeitos a cura normal e após envelhecimento em água, seja $\geq 0.5 \text{ N/mm}^2$. Os valores incluídos na Figura 4.1 e Quadro 4.1 mostram que nenhum dos cimentos-cola sujeito a cura normal cumpriu este requisito. Contudo, considerando a diferença entre a tensão de aderência inicial do MC_FCC0 e do cimento-cola comercial da CIARGA (no valor de 0.38 N/mm^2) que se atribui à ausência do *filler* nos cimentos-cola da série MC_FCC os valores de tensão de aderência previstos para o MC_FCC12.5, MC_FCC25, MC_FCC37.5 e MC_FCC50 se estes tivessem o *filler* na sua constituição seriam 0.74 , 0.61 , 0.59 e 0.55 N/mm^2 , respetivamente. Assim, espera-se que a reprodução exata do cimento-cola comercial com substituição até 50% (em massa) de cimento por FCC conduziria ao cumprimento do requisito normativo.

TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS IMERSÃO EM ÁGUA

O ensaio de determinação da tensão de aderência inicial após imersão em água pretende simular o desgaste de um cimento-cola sujeito à ação da água. Para tal, as amostras são imersas em água durante 21 dias, findos os quais são ensaiadas (secção 3.5.1)

A análise da Figura 4.1 mostra que o valor máximo de tensão de aderência neste ensaio é obtido para o cimento-cola com teor de substituição de cimento por FCC de 12,5%, MC_FCC12.5. Os cimentos-cola com teores de substituição parcial de cimento por FCC superiores a 12,5% apresentam uma tendência decrescente deste resultado em função do aumento teor de incorporação de FCC.

Aliás, verifica-se também na Figura 4.1 que os resultados destes ensaios apresentam a mesma tendência que os resultados do ensaio de aderência com cura normal, mas com valores mais elevados. Estes resultados poderão ser explicados pelo prolongamento da reação de hidratação do cimento devido à colocação das amostras dentro de água.

Da análise da Figura 4.1 é também possível verificar que os resultados dos cimentos-cola MC_FCC0, MC_FCC12.5 e MC_FCC25 em relação à tensão de aderência cumprem o requisito normativo, i.e., apresentam valores de tensão de aderência média $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$. Contudo, e tal como se disse atrás prevê-se que incluindo o *filler*, que também está presente no CCC-CIARGA, os valores de tensão de aderência aumentassem cerca de 0.61 N/mm^2 (1.15-0.54) pelo que nesse caso o MC_FCC37.5 e MC_FCC50 apresentariam valores de tensão de aderência de 0.97 e 0.75 N/mm^2 pelo que também cumpririam o requisito da norma. Assim, conclui-se que a reprodução exata do cimento-cola comercial com substituição até 50% (em massa) de cimento por FCC, após imersão em água, conduzem ao cumprimento do requisito normativo.

TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS ENVELHECIMENTO POR CALOR

A determinação da tensão de aderência após envelhecimento por calor pretende simular o desgaste de um cimento-cola face à ação do calor. As amostras são condicionadas durante 14 dias, em estufa, a uma temperatura de 70°C antes de serem ensaiadas (secção 3.5.1). Como se disse atrás (Quadro 2.3), a realização deste ensaio com cura com calor - e, conseqüentemente, o cumprimento de um requisito mínimo de aderência - não é exigida no caso do tipo de cimentos-cola da série MC_FCC, i.e., dos cimentos-cola sem características especiais ou adicionais (norma EN 12004, anexo ZA,

tabela ZA.1.1). No entanto, como também foi referido anteriormente (secção 4.2), o ensaio foi realizado como forma de obter mais informação em relação ao efeito de incorporação de FCC nos cimentos-cola desta série.

A análise da Figura 4.1 mostra que os valores máximos de tensão de aderência obtidos neste ensaio não atingem os 0,10 N/mm². Estes valores são bastante inferiores aos valores de tensão de aderência obtidos com as outras formas de cura das mesmas amostras. Além disso, os resultados apresentam valores tão dispersos que os resultados das amostras MC_FCC25, MC_FCC37.5 e MC_FCC50 foram obtidos da média de 2 ou 3 amostras (Quadro 4.1) uma vez que os outros resultados por se encontrarem 20% acima e abaixo dos valores médios não foram considerados (de acordo com a recomendação especificada na norma NP EN 1348). Por este motivo, a análise destes resultados deve ser realizada com a necessária reserva. Neste contexto, parece prudente apenas referir que a incorporação de FCC nos cimentos-cola desta série contribui para a diminuição dos valores da tensão de aderência sob ação de calor. Noutros estudos referidos neste trabalho em que o cimento foi substituído parcialmente por um material pozolânico não se efetuou o ensaio de determinação da aderência após envelhecimento por calor, pelo que estes resultados não podem ser comparados [41].

TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS “TEMPO ABERTO”

Os ensaios para determinação da tensão de aderência após um determinado “tempo aberto” são utilizados para determinar o intervalo de tempo máximo que pode decorrer entre a aplicação do cimento-cola e a aplicação dos ladrilhos, de forma a que a tensão de aderência seja superior ao requisito imposto pela norma NP EN 12004. No caso dos cimentos-cola para utilização interior, sem características especiais ou adicionais, que se estão a estudar com a série dos cimentos-cola MC_FCC, a norma NP EN 12004 não impõe nenhum requisito mínimo para esta característica. No entanto, foram determinados os valores da tensão de aderência após tempo aberto de 20 minutos e 30 minutos, seguindo o procedimento descrito na secção 3.5.2, com o objetivo de obter mais informação sobre o comportamento destes cimentos-cola.

Da análise da Figura 4.1 verifica-se que os valores das tensões de aderência dos cimentos-cola com incorporação de resíduo de FCC, calculadas a partir dos resultados dos ensaios após tempo aberto a 20 e 30 minutos, são mais elevados do que os obtidos para os mesmos cimentos-cola no ensaio de aderência com cura normal. Enquanto que nos cimentos-cola sem incorporação de FCC o TA parece desfavorecer, ou não alterar significativamente, a tensão de aderência (embora esta observação não possa ser muito

assertiva por que os resultados do cimento-cola MC_FCC0 para TA 20 min apresentam muita dispersão e só foi calculado a partir de dois resultados experimentais (Quadro 4.1). A tensão de aderência nos cimentos-cola MC_FCC12,5 e MC_FCC25 aumenta do ensaio de aderência após tempo aberto de 20 minutos para o de 30 minutos. Em síntese, verifica-se que a ocorrência de um intervalo de tempo entre a aplicação do cimento-cola com incorporação de FCC (entre os 12,5 e os 25%) e a aplicação dos ladrilhos favorece a aderência.

Os valores de tensão de aderência máximos nos ensaios de determinação de aderência após tempo aberto de 20 e 30 minutos foram obtidos com o cimento-cola MC_FCC12.5. Também se observa que para teores de substituição de cimento por FCC acima de 12,5% ocorre uma diminuição gradual da tensão de aderência.

O aumento da tensão de aderência verificado nestes ensaios, em relação ao ensaio de aderência inicial, poderá ser explicado pelo retardamento da reação de hidratação do cimento devido à metilcelulose e à absorção de água por parte do FCC: a absorção de água por parte do FCC poderá condicionar a água disponível para a hidratação do cimento que, por sua vez, já retardada pela ação da metilcelulose, é favorecida pela ocorrência de um intervalo de tempo superior entre a aplicação do cimento-cola e a aplicação dos ladrilhos. Tipicamente, nos ensaios de determinação da tensão de aderência após tempo aberto, ocorre uma diminuição da tensão de aderência média, em função do aumento do TA [48] .

MODO DE FALHA NAS ROTURAS

Neste trabalho identificou-se o modo de falha na rotura das amostras para as quais se determinaram as tensões de aderência (secção 4.2.1). Os modos de falha na rotura - nomeadamente, se são coesivos ou adesivos e se ocorrem na cola, no suporte ou no ladrilho ou numa destas interfaces - assumem designações e notações distintas especificadas na norma EN 12004 (secção 3.5.5). Esta identificação visual do modo de falha na rotura complementa a caracterização do comportamento dos cimentos-cola em função da sua composição e do tipo de cura a que foi sujeito.

O modo de falha de cada ladrilho ensaiado foi registado nas fichas com os resultados dos ensaios, constantes do Anexo B.

A título exemplificativo, a Figura 4.2 apresenta uma fotografia da superfície de rotura de um ladrilho após a realização do ensaio de determinação da tensão de aderência, com um cimento cola MC_FCC50 sujeito a cura normal no qual se verificou o modo de falha

típico desta série de cimentos-cola, i.e., uma rotura adesiva na interface ladrilho/cimento-cola, que corresponde à notação AF-T.



Figura 4.2 - Fotografia da superfície de rotura de um ladrilho no qual se usou o cimento-cola MC_FCC50 em cura normal após o ensaio de determinação da tensão de aderência. Modo de falha da rotura AF-T

O modo de falha AF-T, resulta de uma adesão insuficiente entre o ladrilho e o cimento-cola que poderá ser causada pela ausência de *filler* que poderá provocar uma descontinuidade na curva granulométrica da mistura seca e que dificulta, também, a capacidade de molhar o ladrilho.

O modo de falha registado predominante nos ladrilhos da série de cimento-cola MC_FCC foi AF-T, Contudo, em alguns ladrilhos, esporadicamente, verificou-se simultaneamente mais do que um modo de falha, nomeadamente AF-T e CF-A, embora nestes casos a superfície correspondente à falha CF-A fosse sempre de menor expressão face à falha do tipo AF-T, como é exemplo a Figura 4.3.

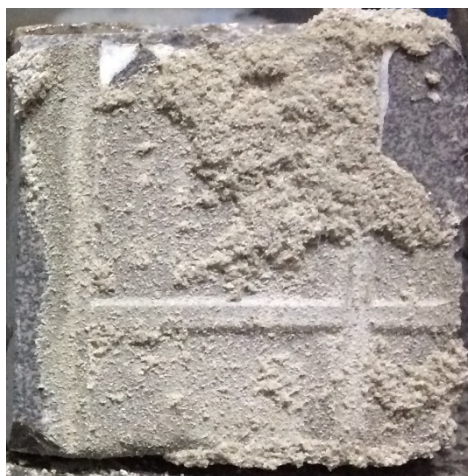


Figura 4.3 - Fotografia da superfície de rotura de um ladrilho no qual se usou o cimento cola MC_FCC50, após o ensaio de determinação da tensão de aderência após “tempo aberto 20 minutos. Modo de falha na rotura: AF T com alguma área de CF-A

4.2.2. CAPACIDADE DE TRANSFERÊNCIA DO CIMENTO-COLA PARA O LADRILHO

A capacidade de transferência do cimento-cola para o ladrilho (secção 3.5.6) é uma propriedade cuja análise também complementa o estudo da aderência, uma vez que uma maior capacidade de transferência significa que existe maior superfície de contacto entre o ladrilho e o cimento-cola, que se deveria traduzir, conseqüentemente, numa maior tensão de aderência. Também a variação da capacidade de transferência em função do tempo poderá ajudar a explicar os valores de tensão de aderência nos ensaios de aderência após “tempo aberto”.

O Anexo C apresenta as fotografias dos ladrilhos das amostras dos cimentos-cola da série MC_FCC a partir das quais se avaliou a capacidade de transferência do cimento-cola para o ladrilho. Estas fotografias foram analisadas, seguindo o procedimento descrito na secção 3.5.6, para traduzir a capacidade de transferência de cimento-cola para o ladrilho através da percentagem da área de ladrilho no qual se constata a presença de cimento-cola.

A título exemplificativo, a Figura 4.4 apresenta uma fotografia do ladrilho do cimento-cola MC_FCC37,5 aplicado ao fim de 60 min e retirado após 10 min (secção 3.5.6) pondo em evidência a forma como se analisaram estas imagens para quantificar a percentagem da área do ladrilho para a qual ocorreu transferência de cimento-cola.

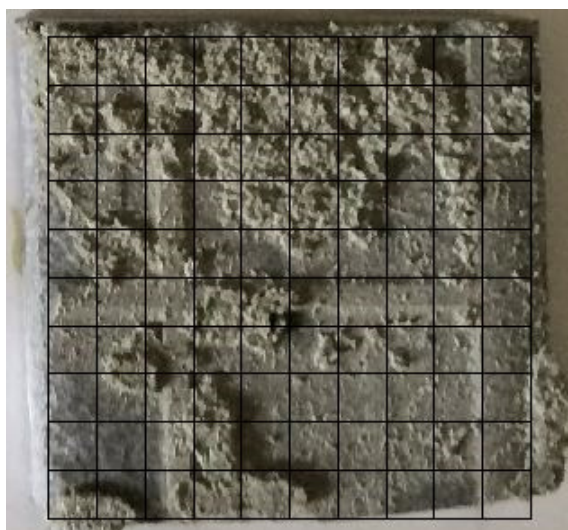


Figura 4.4 - Foto do cimento cola MC_FCC37,5 (aplicado ao fim de 60 min e retirado após 10 min) pondo em evidência a matriz usada para identificar a percentagem da área do ladrilho - 33 % - para a qual ocorreu transferência.

O Erro! A origem da referência não foi encontrada. Quadro 4.2 apresenta a sistematização quantitativa desta transferência dos cimentos-cola da série MC_FCC para os ladrilhos.

Quadro 4.2 - Capacidade de transferência dos cimentos cola da série MC_FCC expressa através da porcentagem da área de ladrilho coberta por cimento cola em função do tempo (t) decorrido entre a aplicação do cimento cola, no suporte, e a aplicação do ladrilho (em min)

	t [minuto]					
	10	20	30	40	50	60
MC_FCC0	30	24	42	79	44	25
MC_FCC12,5	20	28	50	79	78	59
MC_FCC25	14	44	55	60	31	34
MC_FCC37,5	13	24	24	25	35	33
MC_FCC50	16	33	54	71	35	27

Legenda: t - minutos entre a aplicação do cimento-cola no suporte e a aplicação do ladrilho

Da análise do Quadro 4.2 observa-se que, de uma forma geral, a capacidade de transferência do cimento-cola para o ladrilho aumenta progressivamente com o aumento do tempo de espera até à aplicação do ladrilho até um determinado intervalo de tempo a partir do qual a capacidade de transferência do cimento-cola para o ladrilho volta a diminuir. Ou seja, verifica-se que, exceto para o MC_FCC37,5, todos os cimentos-cola, atingem o valor máximo de transferência após 40 minutos de espera entre a aplicação do cimento-cola e a aplicação dos ladrilhos. Após os 40 min (ou 50 min no caso do MC_FCC37,5) a capacidade de transferência volta a diminuir. O MC_FCC37,5 apresentou um resultado diferente.

Estes resultados ajudam a justificar, em particular, o aumento da tensão de aderência média nos cimentos-cola da série MC_FCC nos ensaios de avaliação do tempo aberto, em que a aplicação dos ladrilhos é diferida 20 e 30 minutos da aplicação do cimento-cola sobre o suporte: com o aumento do tempo entre a aplicação do cimento-cola e dos ladrilhos aumentou a aderência e a capacidade de transferência (Figura 4.1).

Os resultados constantes no Quadro 4.2 ajudam também a explicar, de uma forma geral, a evolução das tensões de aderência médias verificadas nos vários ensaios realizados para os cimentos-cola da série MC_FCC. A capacidade de transferência média aumenta para o cimento-cola MC_FCC12,5, assim como a tensão de aderência média em todos os ensaios. A diminuição da tensão média de aderência após o máximo verificado para o MC_FCC12,5, em função do aumento do teor de FCC, é acompanhado pela diminuição da capacidade de transferência (excepto no caso do cimento-cola

MC_FCC50 cujos resultados do ensaio de capacidade de transferência só são coerentes para t=60 min).

4.2.3. RESISTÊNCIA AO ESCORREGAMENTO

O escorregamento é o movimento descendente dos ladrilhos aplicados sobre substratos verticais ou inclinados. A determinação do escorregamento faz-se segundo o procedimento constante na norma EN 1308 (que se encontra descrito com mais pormenor na secção 3.5.3). Resumidamente, são aplicados 2 ladrilhos sobre uma camada de cimento-cola, talochada paralelamente ao maior bordo de uma placa de cimento que é posteriormente colocada na vertical. A distância entre o bordo de cada ladrilho em relação ao bordo da placa de cimento é medida com a placa ainda na horizontal e 20 minutos após esta ter sido colocada na vertical. O escorregamento, para cada ladrilho, corresponde à diferença entre as duas medições.

Para o tipo de cimento-cola reproduzido na série MC_FCC, o valor do escorregamento não é imposto pela norma. No entanto, e de forma a melhor compreender a influência da substituição parcial de cimento pelo resíduo de catalisador de FCC, realizou-se o ensaio de determinação do escorregamento também para os cimentos-cola desta série. Para cada cimento-cola foram preparadas e ensaiadas duas amostras (dois ladrilhos), sendo que os resultados apresentados no Quadro 4.3 e na Figura 4.5 correspondem à média desses dois valores.

Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios de escorregamento dos cimentos-cola da série MC_FCC

	MC_FCC0	n	MC_FCC12.5	n	MC_FCC25	n	MC_FCC37.5	n	MC_FCC50	n	CCC-CIARGA	n
Escorregamento [mm]												
Escorregamento	0.63	2	0.72	2	0.38	2	0.38	2	0.28	2	0.17	2

Legenda: n - nº de amostras utilizadas no cálculo da média

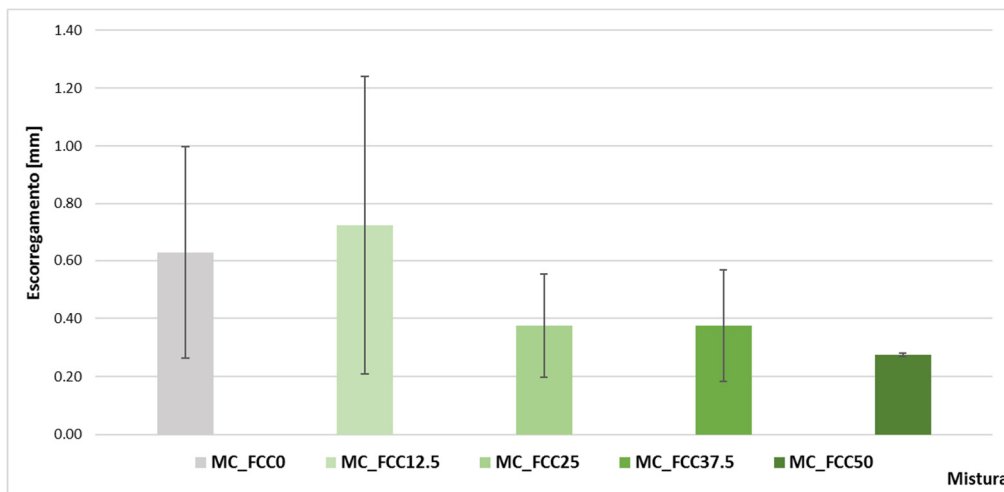


Figura 4.5 - Resultados dos ensaios de escorregamento obtidos com os cimentos-cola da série MC_FCC

Os valores médios do escorregamento (Quadro 4.3 e Figura 4.4) obtidos para os cimentos-cola da série MC_FCC e os respectivos desvios-padrão indicam que os resultados apresentam elevada dispersão e, portanto, são pouco precisos. Esta constatação é particularmente válida no caso dos cimentos-cola quando se pretende fazer uma análise relativa dos resultados dos cimentos-cola MC_FCC0 e MC_FCC12.5 cuja diferença nos resultados é inferior ao desvio-padrão de qualquer uma das amostras (Figura 4.5). Por este motivo, apenas se pode afirmar que os resultados indiciam que a substituição parcial de 12,5%, em massa, de cimento por FCC não afetam os valores do escorregamento dos cimentos-cola desta série. Contudo, para um teor de incorporação de FCC de 25% verifica-se uma tendência de diminuição do escorregamento em relação os cimentos-cola MC_FCC0 e MC_FCC12.5 e para valores para teores de incorporação de FCC superiores a 25% os resultados mantém-se estatisticamente inalterados.

O FCC incorporado na composição do cimento-cola contribui para a diminuição da trabalhabilidade da mistura tornando-a menos fluida no estado fresco e, conseqüentemente, dificultando o escorregamento dos ladrilhos por ação do seu peso próprio. Este comportamento é atribuído à estrutura microporosa e à elevada área superficial específica do FCC [49]. Estes resultados estão concordantes com os obtidos na determinação da tensão de aderência, em que a perda de trabalhabilidade também explicou a evolução dos resultados: a maior tensão de aderência e o maior escorregamento verificaram-se para o cimento-cola MC_FCC12.5, ocorrendo para os cimentos-cola com teores de substituição de cimento por FCC a cima de 12.5% uma diminuição da aderência e do escorregamento de forma sistemática.

Adicionalmente, o aumento de consistência dos cimentos-cola com teores de incorporação superiores a 25% do teor de ligante e conseqüente diminuição do movimento dos ladrilhos durante o ensaio justificam a diminuição do desvios-padrão dos resultados de escorregamento obtidos com estas amostras.

4.3. SÉRIE DE CIMENTOS-COLA MCR_FCC

As composições dos cimentos-cola da série que se designou MCR_FCC partem de uma mistura de referência MCR_FCC0 (Quadro 3.1) com substituição parcial entre 0 e 50% de cimento por FCC com incrementos de 12,5%. Os cimentos-cola desta série são compostos por: cimento, areia siliciosa, *filler* calcário, metilcelulose, resina (polímero redispersível) e FCC. A incorporação de um polímero redispersível confere flexibilidade e maior adesão ao cimento-cola, o que justifica a sua classificação como cimento-cola melhorado, com escorregamento reduzido e elevada deformabilidade, ou seja, do tipo C 2TS2 (Quadro 3.5). Estes cimentos-cola têm que corresponder aos requisitos especificados na norma EN 12004 (que se encontram reproduzidos no Quadro 2.3 do subcapítulo 2.3). A mistura de referência (MCR_FCC0) pretende reproduzir o cimento-cola comercial equivalente produzido pela CIARGA .

4.3.1. TENSÃO DE ADERÊNCIA

Para os cimentos-cola da série MCR_FCC foram realizados os ensaios de aderência definidos nas normas NP EN 1348 e NP EN 1346:

- com cura normal: após 28 dias de cura normal (secção 3.5.1) que se abreviou por “28d cn”
- após imersão em água: 7 dias de cura normal + 21 dias de cura em água (secção 3.5.1) que se abreviou por “7d cn + 21d ca”
- após envelhecimento por calor: 14 dias de cura normal + 14 dias de cura sob calor + 1 dia de cura normal (secção 3.5.1) que se abreviou por “14d cn + 14d cc + 1d cn”
- após um “tempo aberto”: cura normal e aplicação dos ladrilhos diferida 20 e 30 minutos da aplicação do cimento-cola (secção 3.5.2) que se abreviou por “TA 20 min” e “TA 30 min”, respetivamente.

O ensaio de determinação da tensão de aderência consiste na aplicação de uma força de tração a uma peça metálica, previamente colada ao ladrilho, até que o ladrilho se destaque do substrato ao qual foi colado com o cimento-cola (secção 3.5.1).

O Quadro 4.4 e a Figura 4.6 apresentam os resultados da tensão de aderência média e os respetivos desvios-padrão, obtidos com os cimentos-cola da série MCR_FCC. A linha horizontal representada na Figura 4.6 indica o valor que a norma impõe como requisito para este tipo de cimento-cola (quadro 3.5) em relação aos resultados obtidos nos

ensaios de aderência, exceto o de determinação da tensão de aderência após tempo aberto alargado - 30 minutos – que não é exigido pela norma NP EN 12004.

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios de aderência, tempo aberto, escorregamento e deformação dos cimentos-cola da série MCR_FCC

		Série MC_FCC									
		MC_FCC0	n	MC_FCC12.5	n	MC_FCC25	n	MC_FCC37.5	n	MC_FCC50	n
		Aderência EN 1348 e EN 1346 [N/mm ²]									
28d cn		2.42	9	2.34	9	2.30	10	2.00	10	1.39	10
	7d cn + 21d ca	0.87	8	1.00	8	1.12	10	0.98	10	0.66	7
14d cn + 14d cc + 1d cn		2.35	9	2.23	9	2.36	9	1.95	8	1.23	10
Tempo aberto	20 min	2.26	10	2.46	10	2.39	10	2.26	10	1.37	9
	30 min	2.19	6	2.40	6	2.74	9	2.08	10	1.42	9

Legenda: n - nº de amostras utilizadas no cálculo da média; d - dias; cn - cura normal; ca - cura em água; cc - cura ao calor 70°C

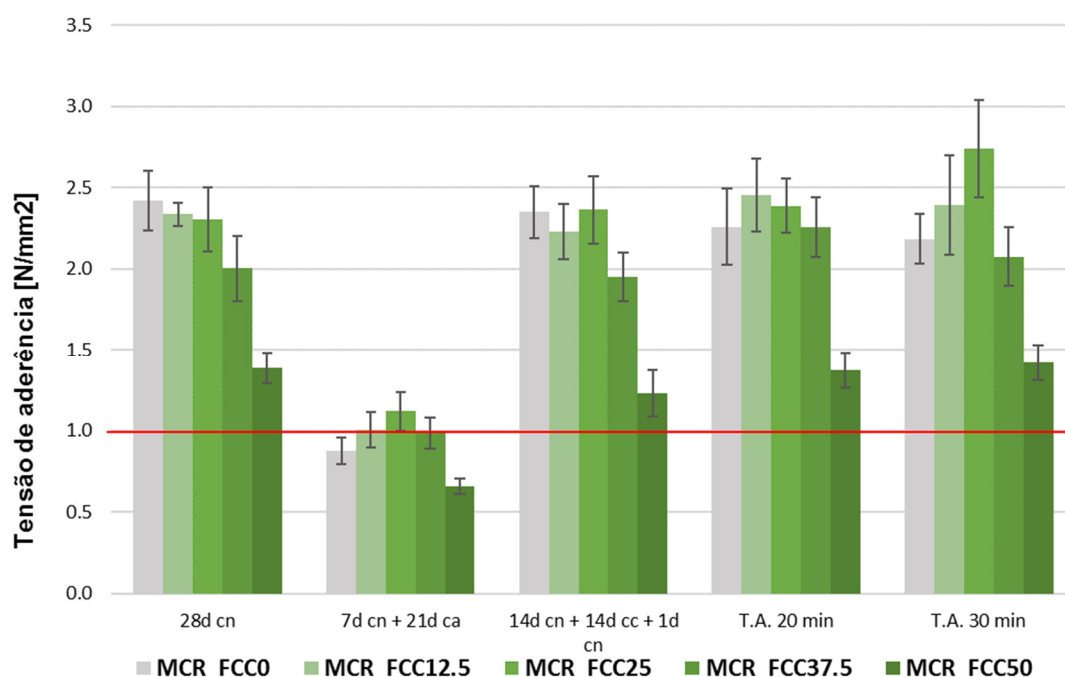


Figura 4.6 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios de aderência dos cimentos-cola da série MCR_FCC

Os resultados da tensão de aderência média dos cimentos-cola da série MCR_FCC, para cada ensaio, são significativamente superiores aos da série MC_FCC, apresentados na Figura 4.1. A dispersão nos resultados foi inferior à da série MC_FCC, de tal forma que o número médio de amostras consideradas para o cálculo da tensão

média de aderência para os vários ensaios da série MCR_FCC foi $n=9$ (Quadro 4.4), face aos $n=6$ verificados para a série MC_FCC (Quadro 4.1).

TENSÃO DE ADERÊNCIA COM CURA NORMAL

Os resultados do ensaio de determinação da tensão de aderência com cura normal foram apresentados na Figura 4.6.

O cimento-cola de referência, MC_FCC0, apresenta a maior tensão de aderência, enquanto os restantes cimentos-cola seguem uma tendência decrescente à medida que aumenta o teor de substituição do cimento por FCC. Os resultados relativos aos cimentos cola MC_FCC0, MC_FCC12,5 e MC_FCC25 são muito semelhantes, sendo que a diferença entre o valor da tensão de aderência de MC_FCC0 e MC_FCC25 é aproximadamente $0,12 \text{ N/mm}^2$, um valor inferior aos respetivos desvios-padrão.

A partir da mistura com 37,5% de teor de substituição de cimento por FCC a tensão de aderência diminui de forma significativa, ocorrendo uma diminuição mais abrupta para os resultados relativos à mistura MCR_FCC50. Este resultado era esperado e está de acordo com o observado noutra trabalho em que um material pozolânico, a cinza volante, foi utilizado como substituto parcial do cimento [41]. Esta diminuição deverá ser causada pela heterogeneidade apresentada pelo cimento-cola com teores mais elevados de FCC. A formação de menor quantidade de compostos ligantes do cimento limita também a quantidade de Ca(OH)_2 disponível para a reação pozolânica do FCC, contribuindo estes dois fatores para a diminuição da tensão de aderência.

Como é possível verificar na Figura 4.6 todos os cimentos-cola cumprem o requisito imposto pela norma, ou seja, apresentam tensões médias de aderência acima de $1,0 \text{ N/mm}^2$, exceto três cimentos-cola no ensaio de aderência após imersão em água (MC_FCC0, MC_FCC37,5 e MC_FCC50).

TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS IMERSÃO EM ÁGUA

Os resultados do ensaio de determinação da tensão de aderência após imersão em água são os apresentados na Figura 4.6.

O valor máximo da tensão de aderência ocorre para o cimento-cola MCR_FCC25, enquanto o valor mínimo é verificado para o MCR_FCC50. O aumento da tensão de aderência nas misturas MCR_FCC12,5, MCR_FCC25 e MCR_FCC37,5 em relação à

mistura de referência (MCR_FCC0) será uma consequência da atividade pozolânica do FCC.

Da análise da Figura 4.6 verifica-se que apenas dois cimentos-cola cumprem o requisito da norma (Quadro 2.3): MCR_FCC12,5 e MCR_FCC25. O resultado do cimento-cola MCR_FCC37,5 é inconclusivo uma vez que o desvio-padrão associado à amostra é superior à diferença entre a tensão média calculada e o valor mínimo estabelecido na norma.

Importa referir que o cimento-cola que se pretendia reproduzir com os cimentos-cola da série MCR_FCC cumpre o requisito normativo, o que não acontece com o cimento-cola de referência que deveria ter um resultado semelhante. Por razões de preservação da propriedade intelectual da CIARGA, o cimento-cola preparado não será exatamente igual ao comercial correspondente. Assim, seria de esperar que, substituindo o cimento por FCC no cimento-cola comercial, pelo menos o MCR_FCC37,5 também cumprisse o requisito normativo.

Na Figura 4.6 é possível observar que os valores mais baixos da tensão de aderência média dos cimentos-cola da série MCR_FCC ocorrem para o ensaio de determinação da tensão de aderência após imersão em água. Este resultado era esperado pelo facto de já ter sido observado noutros trabalhos realizados sobre cimentos-cola com polímeros redispersíveis [41]. A imersão das amostras em água, 7 dias após a sua preparação, tem o efeito contrário ao que ocorre nas misturas da série MC_FCC. Sendo o polímero redispersível responsável pelo aumento das tensões de aderência neste tipo de cimentos-cola, o condicionamento das amostras em água parece atenuar, quase anular, este efeito. Deduz-se que pelo facto de as amostras terem sido imersas numa fase em que a matriz sólida do cimento ainda não está totalmente formada, o polímero redispersível possa ter sido diluído na água [41].

TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS ENVELHECIMENTO POR CALOR

Os valores médios da tensão de aderência após envelhecimento por calor, dos cimentos-cola da série MCR_FCC são apresentados na forma de gráfico na Figura 4.6.

A máxima tensão de aderência ocorre para a mistura MCR_FCC25, no entanto esta e as misturas MCR_FCC0 e MCR_FCC12,5 são equivalentes, estatisticamente. A ligeira diminuição da tensão média para a mistura MCR_FCC12,5 não segue nenhuma tendência verificada anteriormente. Novamente observa-se que o cimento-cola

MCR_FCC50 apresenta o valor mais baixo. Todos os cimentos-cola desta série cumprem o requisito da norma.

O envelhecimento das amostras através do calor não altera significativamente a tensão média de aderência das misturas desta série, quando comparada com a tensão de aderência média no ensaio de aderência com cura normal, como é possível observar na Figura 4.6. Os resultados num e noutra ensaio são, de facto, muito semelhantes, sendo a maior diferença igual a $0,16 \text{ N/mm}^2$ (cimento-cola MCR_FCC50). Noutros trabalhos os resultados foram muito semelhantes, embora, para o mesmo cimento-cola e dependendo do teor e do tipo dos aditivos incluídos, a tensão de aderência após envelhecimento por calor possa estar acima ou abaixo da tensão de aderência inicial, mas sempre muito próxima deste valor [48].

TENSÃO DE ADERÊNCIA APÓS “TEMPO ABERTO”

Os resultados dos ensaios de determinação da tensão de aderência após um tempo aberto dos cimentos-cola da série MCR_FCC são apresentados na forma de um gráfico na Figura 4.6.

O valor máximo, no ensaio a 20 minutos, é observado para o cimento-cola MCR_FCC12,5, embora os resultados de MCR_FCC0, MCR_FCC12,5, MCR_FCC25 e MCR_FCC37,5 sejam muito próximos uns dos outros e as diferenças entre as tensões médias de aderência inferiores aos respetivos desvios-padrão.

No ensaio de tempo aberto a 30 minutos as tensões de aderência aumentam gradualmente até ao valor máximo observado para o cimento-cola MCR_FCC25. Para teores de substituição de cimento por FCC superiores a 25%, a tensão de aderência diminui gradualmente com o aumento do teor de FCC.

A norma NP EN 12004 exige que um cimento-cola do tipo reproduzido na série MCR_FCC tenha, pelo menos, um tempo aberto de 20 minutos, isto é: a tensão de aderência média calculada para o cimento-cola ensaiado deverá ser no mínimo igual ao valor exigido pela norma, neste ensaio (secção 3.5.2). Como é possível observar na Figura 4.6, todos os cimentos-cola da série MCR_FCC cumprem o requisito da norma, e ainda satisfazem os requisitos exigidos a um cimento-cola com tempo aberto alargado (30 minutos).

MODO DE FALHA NAS ROTURAS

A identificação do modo de falha associado a cada amostra contribui para uma caracterização mais completa dos fenômenos que contribuem para a rotura das amostras ensaiadas. A sistematização dos resultados é apresentada no Quadro 4.5, em que foram utilizados dois esquemas de cores: várias graduações de verde para os modos de rotura do tipo coesivo (CF-A e CF-S) e BT (falha adesiva entre a peça metálica e o ladrilho) e diferentes graduações de vermelho para o modo de rotura do tipo adesivo (AF-T). A representação seguindo este esquema de cores tem por objetivo destacar, a verde, os modos de falha coesiva já que a sua ocorrência significa que a tensão de aderência desse cimento-cola seria na realidade superior, uma vez que não ocorreu uma falha adesiva.

Quadro 4.5 – Sistematização dos modos de falha na rotura identificadas nos ensaios de determinação da tensão de aderência para os cimentos-cola da série MCR_FCC

	28d cn				7d cn + 21d ca		14d cn + 14d cc + 1d cn			T.A. 20			T.A. 30		
	AF-T	CF-A	CF-S	BT	AF-T	CF-A	AF-T	CF-A	CF-S	AF-T	CF-A	BT	AF-T	CF-A	CF-S
MCR_FCC0	0	90	10	0	100	0	20	80	0	30	70	0	80	20	0
MCR_FCC12.5	0	90	0	10	100	0	0	90	10	30	60	10	20	70	10
MCR_FCC25	0	100	0	0	100	0	20	80	0	30	70	0	30	60	10
MCR_FCC37.5	70	30	0	0	100	0	0	100	0	40	60	0	90	10	0
MCR_FCC50	90	10	0	0	100	0	40	60	0	70	30	0	90	10	0

Da análise do Quadro 4.5 identifica-se que, à exceção dos resultados do ensaio de determinação da tensão de aderência após imersão em água e do cimento-cola MC_FCC0 no ensaio após tempo aberto de 30 minutos, existe uma tendência para o modo de rotura identificado passar de CF-A para AF-T com o aumento do teor de FCC acima dos 12,5%. De uma forma geral, os cimentos-cola com 12,5% e 25% de teor de substituição de cimento por FCC revelam modos de rotura típicos de uma melhor aderência. Este resultado está em linha com a evolução das tensões de aderência verificadas na série MCR_FCC em que a tensão de aderência máxima ocorreu para os cimentos-cola MCR_FCC12,5 e MCR_FCC25.

As fotografias da Figura 4.7 apresentam, a título exemplificativo, as superfícies de rotura de quatro amostras da série MCR_FCC obtidas no ensaio de determinação da tensão de aderência com cura normal.

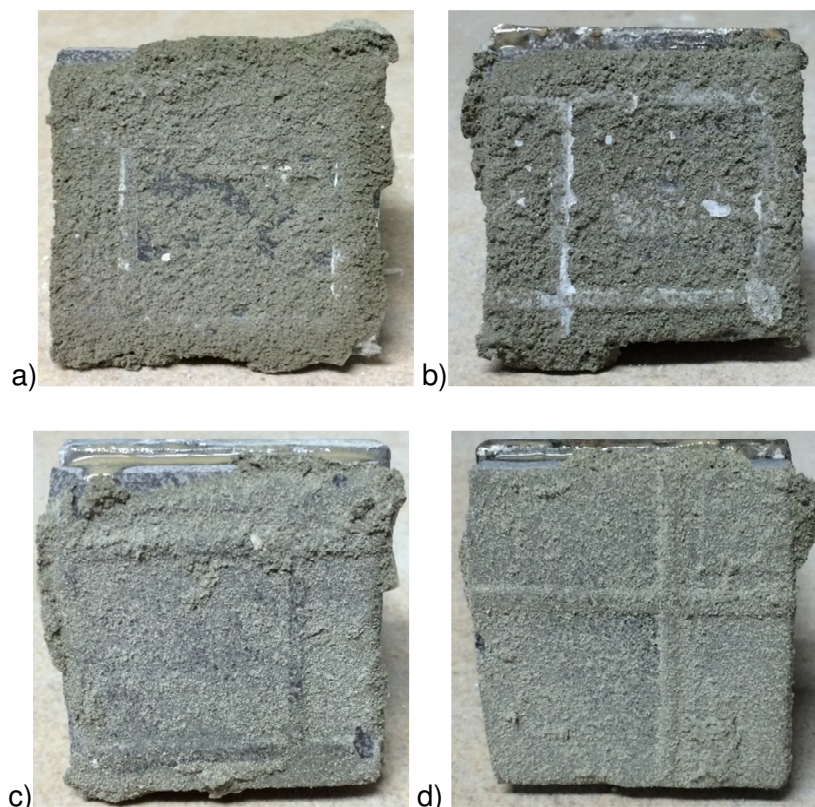


Figura 4.7 - Figuras de rotura do ensaio de aderência com cura normal para os cimentos-cola: a) MCR_FCC0 – CF-A; b) MCR_FCC12,5 – CF-A; c) MCR_FCC37,5 – AF-T; d) MCR_FCC50 – AF-T

Nas amostras a) e b) apresentadas na Figura 4.7 o modo de rotura identificado é CF-A, falha coesiva do cimento-cola, o que significa que a rotura ocorreu no interior do cimento-cola. Este modo de falha é o ideal neste tipo de produtos porque significa que a resistência à tração foi mobilizada no seio do material colante (cimento-cola). A falha coesiva é típica dos cimentos-cola que incluem polímeros redispersíveis na sua composição, e quando sujeitos a cura normal. Os polímeros redispersíveis formam compostos ligantes orgânicos que conferem maior adesão ao ladrilho e ao suporte, limitando a ocorrência de falhas do tipo adesiva [50].

Nas amostras c) e d) da Figura 4.7 o modo de rotura predominante é AF-T, falha adesiva na interface ladrilho-cimento-cola. Este tipo de rotura evidencia uma adesão deficiente entre o ladrilho e o cimento-cola.

Na Figura 4.8 estão representadas fotografias das superfícies de rotura de quatro amostras de cimentos-cola da série MCR_FCC sujeitas a cura em água.

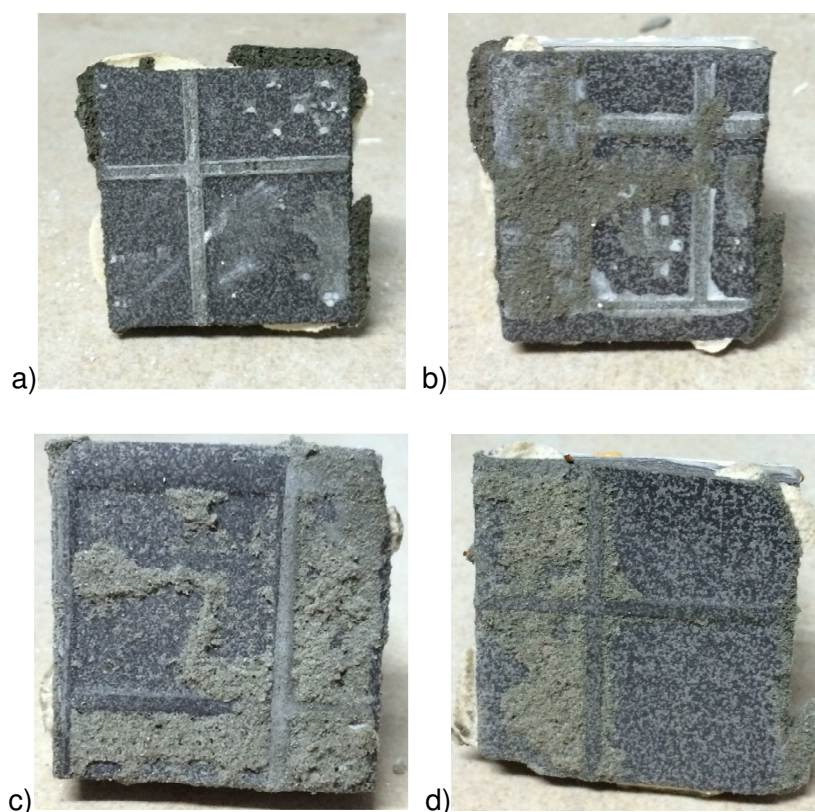


Figura 4.8 - Figuras de rotura no ensaio de aderência inicial após imersão em água para as misturas: a) MCR_FCC0 – AF-T; b) MCR_FCC12,5 – AF-T; c) MCR_FCC25 – AF-T; d) MCR_FCC37,5 – AF-T

A fotografia a) da Figura 4.8 apresenta um modo de falha do tipo AF-T em que a rotura ocorreu na interface ladrilho-cimento-cola. Na fotografia b) é possível verificar que com o aumento do teor de FCC o cimento-cola molha melhor o ladrilho – existe algum cimento-cola na superfície do ladrilho – ocorrendo, parcialmente, falha do tipo CF-A embora sem grande expressão. Na fotografia c) ocorre o mesmo que na figura anterior, mas com uma área de cimento-cola superior no ladrilho. A fotografia d) apresenta a superfície de rotura do cimento-cola MCR_FCC37,5 cujo modo de rotura é novamente AF-T e em que a área de cimento-cola no ladrilho volta a diminuir.

É possível estabelecer uma relação entre o teor de FCC nos cimentos-cola, a tensão de aderência e o modo de rotura: com a cura em água, o teor ótimo de substituição de cimento por FCC é 25% e verifica-se que o modo de falha dos diferentes cimentos-cola, embora seja sempre do tipo AF-T, apresenta gradualmente, até atingir um máximo para MCR_FCC25, maior área de falha coesiva do tipo CF-A.

Em cimentos-cola com incorporação de um polímero redispersível o modo de falha tende a ser do tipo coesivo (CF): o polímero redispersível tem um papel fundamental no aumento da adesão e coesão do cimento-cola [50]. No entanto, a imersão das amostras em água tem um efeito negativo: a água pode dissolver as películas criadas pelos

aditivos orgânicos (metilcelulose e polímero redispersível) limitando o seu efeito e provocando a diminuição da aderência e coesão [48] . Este efeito negativo ficou demonstrado pela diminuição da tensão média de aderência no ensaio de aderência após cura em água e pela ocorrência sistemática da figura de rotura AF-T nos cimentos-colas sujeitos a este tipo de cura.

Na Figura 4.9 são apresentadas fotografias das superfícies de rotura de dois cimentos-cola da série MCR_FCC após cura ao calor.

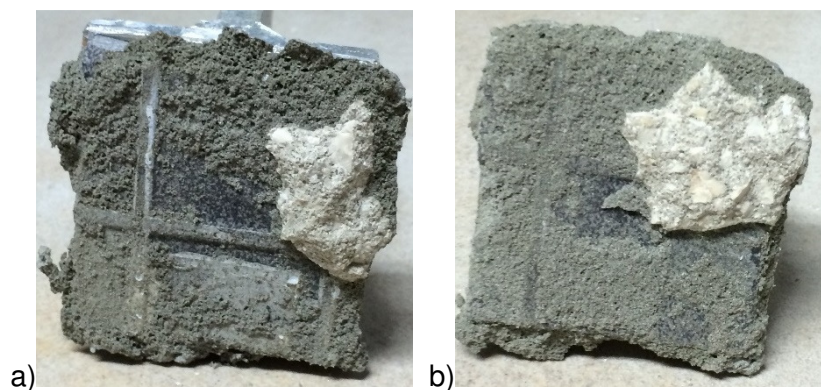


Figura 4.9 - Figuras de rotura no ensaio de aderência inicial após envelhecimento por calor para as misturas: a) MCR_FCC12,5 – CF-A, CF-S e b) MCR_FCC25 – CF-A, CF-S

A figura de rotura predominante em todos os cimentos-cola da série MCR_FCC sujeitos ao envelhecimento por calor é CF-A, rotura coesiva do cimento-cola. Em alguns casos, como nos apresentados na Figura 4.9, para além da falha coesiva do cimento-cola (CF-A) ocorreu pontualmente falha coesiva do suporte (CF-S). Este resultado deve-se ao facto de o calor promover não só as ligações de adesão do polímero redispersível como também a ancoragem mecânica dos compostos de cimento hidratados que se formam nos vazios do cimento-cola [48] .

4.3.2. CAPACIDADE DE TRANSFERÊNCIA DO CIMENTO-COLA PARA O LADRILHO

Os resultados dos ensaios de determinação da capacidade de transferência dos cimentos-cola da série MCR_FCC são apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Capacidade de transferência dos cimentos-cola da série MCR_FCC expressa através da porcentagem da área de ladrilho coberta por cimento-cola em função do tempo (em minuto)

	t [minuto]					
	10	20	30	40	50	60
MCR_FCC0	88	97	95	91	91	85
MCR_FCC12,5	100	100	100	99	79	86
MCR_FCC25	100	97	96	95	55	68
MCR_FCC37,5	89	100	89	95	56	34
MCR_FCC50	34	90	74	52	24	12

Legenda: t - minutos entre a aplicação do cimento-cola no suporte e a aplicação do ladrilho

A capacidade de transferência dos cimentos-cola da série MCR_FCC não é afetada, consideravelmente, até aos 40 minutos, sendo que os maiores valores ocorrem para os menores intervalos de tempo e para os cimentos-cola com teor de substituição de cimento por FCC até 37,5%. Estes resultados ajudam a explicar a pequena variação entre os resultados dos ensaios de determinação da tensão de aderência inicial e os de avaliação do tempo aberto, cujos resultados são muito semelhantes: a ocorrência de um intervalo de tempo entre a aplicação do cimento-cola e a aplicação do ladrilho não tem uma influência significativa na tensão de aderência.

O aumento do teor de FCC não produz um efeito muito acentuado na molhabilidade, até ao cimento-cola MCR_FCC537.5, inclusive, o que está de acordo com os resultados observados nos ensaios de determinação da aderência com cura normal e após tempo aberto de 20 e 30 minutos. O decréscimo acentuado da molhabilidade para o cimento-cola MCR_FCC50 e para t=10 minutos acompanha a tendência de diminuição acentuada da tensão de aderência para o ensaio de aderência com cura normal, embora o resultado pareça demasiado baixo quando comparado com os verificados para t=20 e t=30. Este resultado poderá ter sido fruto de um erro de execução do ensaio.

Os cimentos-cola da série MCR_FCC apresentam, de forma geral, uma molhabilidade superior aos da série MC_FCC, tanto em função do tempo como em função do aumento do teor de FCC. A inclusão de um polímero redispersível parece ter um papel fundamental na capacidade dos cimentos-cola molharem os ladrilhos.

4.3.3. RESISTÊNCIA AO ESCORREGAMENTO

Os resultados do ensaio de determinação do escorregamento são apresentados no Quadro 4.7 e no gráfico da Figura 4.10.

Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de determinação do escorregamento dos cimentos-cola da série MCR_FCC

	MCR_FCC0	n	MCR_FCC12.5	n	MCR_FCC25	n	MCR_FCC37.5	n	MCR_FCC50	n
Escorregamento [mm]										
Escorregamento	0.41	2	0.41	2	0.27	2	0.21	2	0.18	2

Legenda: n - número de amostras utilizadas no cálculo da média

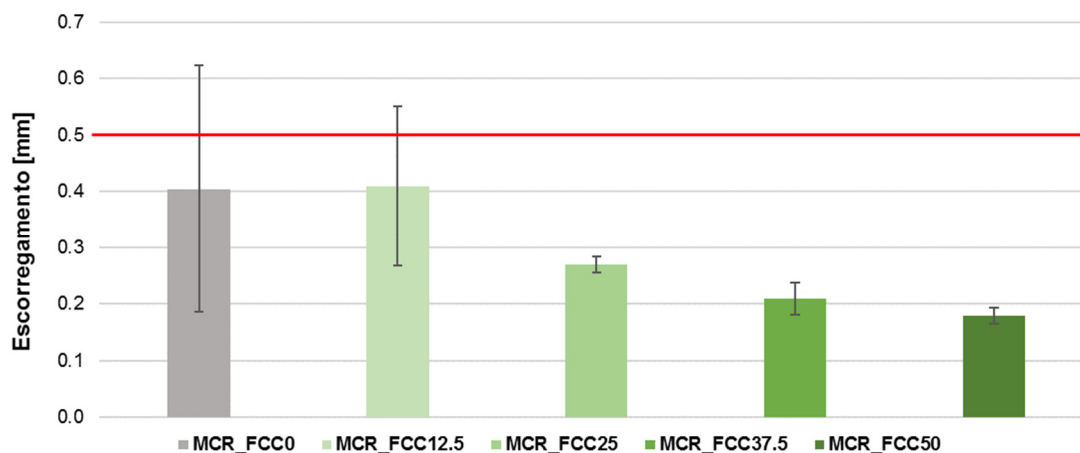


Figura 4.10 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de determinação do escorregamento dos cimentos-cola da série MCR_FCC

Os valores médios do escorregamento dos cimentos-cola da série MCR_FCC cumpriram todos o requisito da norma NP EN 12004 para um cimento-cola deste tipo, de acordo com a qual se o valor de escorregamento for inferior a 0,5 mm os cimentos-cola são classificados como cimentos-cola com escorregamento reduzido.

Os maiores valores de escorregamento foram observados para os cimentos-cola MCR_FCC0 e MCR_FCC12,5, e devido à dispersão das medições associadas à determinação deste valor médio, podemos afirmar que estes resultados são equivalentes.

No entanto, e para teores de substituição de cimento por FCC superiores a 12,5%, verificou-se uma diminuição gradual e consistente do escorregamento, confirmado pela diminuição da dispersão das medições. Um menor escorregamento, ou seja, uma diferença mais pequena entre as duas medições efetuadas, reduz o espetro das leituras o que conduz a uma menor dispersão dos valores medidos.

Numa comparação com os resultados da série MC_FCC, o aumento da dosagem de ligante na série MCR_FCC (35% ao invés dos 20% da série MC_FCC) também aumenta a quantidade de água absorvida pelos cimentos-cola. O consumo de água devido à reação de hidratação do cimento e devido ao FCC, e a ação do polímero redispersível, que aumenta drasticamente a adesão, diminuem a fluidez da mistura no estado fresco, contribuindo para a diminuição do escorregamento dos ladrilhos após a sua aplicação.

4.3.4. DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL

Os resultados do ensaio de deformação transversal são apresentados no Quadro 4.8 e na forma de gráfico na Figura 4.11.

Quadro 4.8 - Resultados dos ensaios de determinação da deformação transversal dos cimentos-cola da série MCR_FCC

	MCR_FCC0	n	MCR_FCC12.5	n	MCR_FCC25	n	MCR_FCC37.5	n	MCR_FCC50	n
Deformação transversal [mm]										
Deformação	6.87	3	6.56	3	7.93	2	7.63	2	10.54	2

Legenda: n - número de amostras utilizadas no cálculo da média

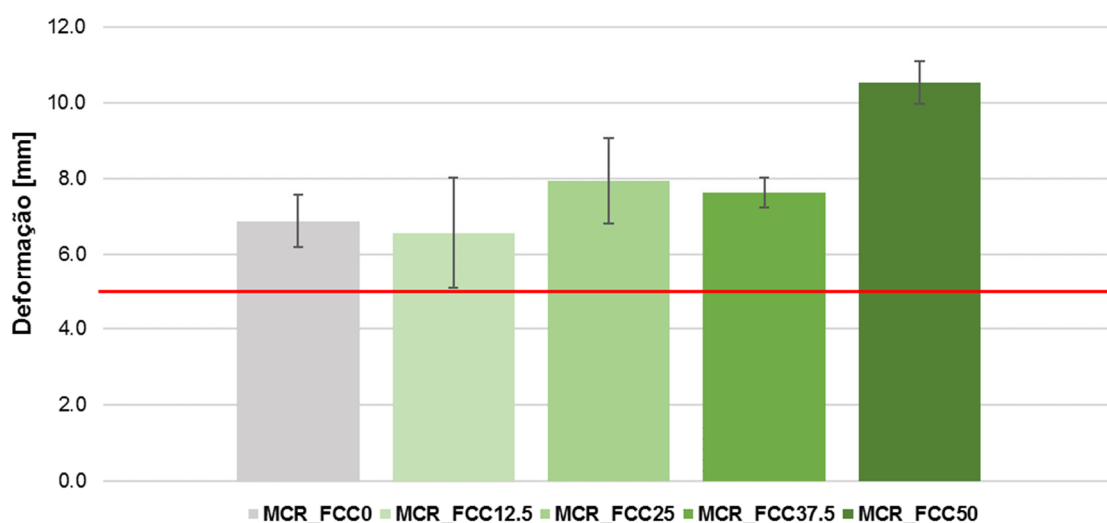


Figura 4.11 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de deformação transversal para todas as misturas da série MCR_FCC

A tendência de evolução desta característica não é linear, no entanto, e tendo em conta o erro associado a cada ensaio, pode afirmar-se que há uma tendência de aumento de deformação transversal com o aumento do teor de substituição de cimento por FCC. Para a mistura MCR_FCC50 registou-se o valor mais elevado de deformação transversal, contrastando com o mínimo verificado para a mistura MCR_FCC12.5. Este resultado é o oposto do esperado de acordo com os resultados verificados num trabalho onde se utilizou um material pozolânico, nomeadamente a cinza volante, como substituto parcial do cimento em cimentos-cola, e em que a deformação transversal diminuiu para todos os teores de substituição [41]. No entanto, num outro trabalho em que o cimento foi substituído parcialmente, com apenas um incremento de substituição de 16,67% em massa do cimento, por pozolanas artificiais, não se verificou uma alteração significativa da deformação transversal dos cimentos-cola [42]. A diminuição da quantidade de cimento na composição dos cimentos-cola poderá favorecer a sua

flexibilidade, já que este material apenas confere resistência mecânica e coesão, sendo a flexibilidade conferida pelo polímero redispersível [42] .

4.4. SÍNTESE DOS RESULTADOS

Em relação à serie MC_FCC, todos os cimentos-cola cumprem os requisitos normativos da NP EN 12004 (Quadro 3.5), se considerado o aumento da tensão de aderência que ocorreria se tivesse sido incluído *filler* na sua composição. No entanto devem ser feitas análises individualizadas tendo em conta o interesse que se pretende privilegiar:

- tecnológico - o cimento-cola MC_FCC12,5 é o que apresenta maior interesse já que apresenta uma tensão de aderência superior à do cimento-cola de referência (MC_FCC0)
- ecológico - o cimento-cola MC_FCC50 cumpre todos os requisitos normativos e ao mesmo tempo que promove uma redução de 50% da quantidade de cimento necessário à sua produção, face ao cimento-cola de referência
- melhor relação tecnologia/ecologia – o cimento-cola MC_FCC25 promove uma redução de 25% na quantidade de cimento necessário à sua produção, face ao cimento-cola de referência, não comprometendo demasiado a tensão de aderência: $-0,10 \text{ N/mm}^2$ e $-0,03 \text{ N/mm}^2$ em relação ao cimento-cola de referência para o ensaio de aderência com cura normal e após imersão em água, respetivamente.

No caso da série MCR_FCC, à exceção dos cimentos-cola MCR_FCC0, MCR_FCC37,5 e MCR_FCC50 para o ensaio de determinação da tensão de aderência pós imersão em água, todos os cimentos-cola cumpriram os requisitos normativos. Também para esta série importa distinguir os diferentes cimentos-cola dependendo do interesse que se pretende privilegiar:

- tecnológico – o cimento-cola MCR_FCC25 apresenta maior tensão de aderência que os restantes em 3 ensaios (aderência após imersão em água, após envelhecimento por calor e após tempo aberto de 30 minutos) e ainda apresentou a segunda maior deformação transversal. Aliado a uma redução de 25% da quantidade de cimento necessário à sua produção, este cimento-cola apresenta, consistentemente, características melhoradas em relação ao cimento-cola de referência MCR_FCC0

- ecológico – sem comprometer nenhum dos requisitos normativos, o cimento-cola MCR_FCC37,5 apresenta a maior redução da quantidade de cimento necessário à sua produção. As tensões de aderência médias registadas para os diferentes ensaios são em dois casos superiores, ou iguais, às do cimento-cola de referência (aderência após imersão em água e após tempo aberto)
- melhor relação tecnologia/ecologia – pelas razões referidas acima será o cimento-cola MCR_FCC37,5.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo são expostas e sumarizadas as conclusões do trabalho desenvolvido, cujo principal objetivo foi avaliar a viabilidade da substituição parcial de cimento por FCC em cimentos-cola. Ainda neste capítulo, são apresentadas propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros, para prossecução do trabalho aqui apresentado.

A campanha experimental realizada neste TFM (Capítulo 3) incluiu a preparação, e ensaio, de duas séries de cimentos-cola que reproduzem dois cimentos-cola de tipos diferentes e com requisitos distintos Quadro 2.4. As conclusões são apresentadas individualmente para o cimento-cola MC_FCC (Subcapítulo 5.2) e MCR_FCC (Subcapítulo 5.3), cujas composições são as constantes no Quadro 3.1.

5.2. SÉRIE MC_FCC

A partir dos ensaios realizados para os cinco cimentos-cola desta série, destacam-se as seguintes conclusões:

- A substituição de 12,5% do cimento por FCC contribui, de forma genérica, para o aumento da tensão de aderência, do cimento-cola (secção 4.2.1). Este aumento é verificado em todos os ensaios de aderência exceto no de aderência após envelhecimento por calor. Em todos os ensaios em que ocorreu esse aumento, os resultados referentes ao cimento-cola MC_FCC12,5 são um máximo
- Para teores de substituição superiores a 12,5% a tensão de aderência dos cimentos-cola diminui gradualmente e de forma consistente para todos os ensaios deste tipo (secção 4.2.1)
- Nos ensaios de determinação da tensão de aderência após envelhecimento em água (secção 4.2.1) verifica-se um aumento global da tensão de aderência em relação à tensão de aderência após cura normal, exceto para o cimento-cola MC_FCC50
- Os resultados do ensaio de determinação da tensão de aderência após envelhecimento por calor (secção 4.2.1) são inconclusivos, uma vez que para

três cimentos-cola (MC_FCC25, MC_FCC37,5 e MC_FCC50) a média da tensão de aderência foi calculada com apenas 2 ou 3 valores experimentais. Os valores experimentais para além de serem muito baixos (o valor mais elevado foi de 0,10 N/mm²) eram também muito dispersos

- A tensão de aderência (secção 4.2.1) dos cimentos-cola com FCC aumenta com o aumento do tempo decorrido entre a aplicação do cimento-cola e a aplicação dos ladrilhos. Nos ensaios de determinação da tensão de aderência após tempo aberto, tanto de 20 como de 30 minutos, registaram-se tensões médias de aderência, nos cimentos-cola que tinham algum teor de FCC, superiores às dos mesmos cimentos-cola mas ensaiados após cura normal. Nos cimentos-cola MC_FCC12,5 e MC_FCC25 verificou-se ainda um aumento da tensão de aderência do ensaio de tempo aberto de 20 minutos para o de tempo aberto de 30 minutos
- A capacidade de transferência do cimento-cola para os ladrilhos diminui a partir dos 40 minutos, exceto para o MC_FCC37,5 em que diminui a partir dos 50 minutos. A capacidade de transferência é afetada pelo teor de FCC: diminui com o aumento do teor de FCC a partir dos 12,5%, para o qual atingiu um máximo, em média (secção 4.2.2)
- O modo de falha nas roturas identificado nas amostras sujeitas aos ensaios de determinação da tensão de aderência foi AF-T (falha adesiva entre o ladrilho e o cimento-cola)
- Do manuseamento dos cimentos-cola no estado fresco, verifica-se que o aumento do teor de FCC reduz a trabalhabilidade dos cimentos-cola, sobretudo quando o teor de substituição de cimento por FCC é igual ou superior a 25%. Os resultados do ensaio de resistência ao escorregamento (secção 4.2.3) atestam essa diminuição da trabalhabilidade, uma vez que o escorregamento diminui com o aumento do teor de FCC.
- Considerando a relação entre os cimentos-cola da série MC_FCC e o cimento-cola comercial que este pretende reproduzir, todos os cimentos-cola da série cumpriram os requisitos normativos exigíveis a um cimento-cola para utilização em ambiente interior.

5.3. SÉRIE MCR_FCC

As conclusões em relação aos cimentos-cola da série MCR_FCC são as seguintes:

- A tensão de aderência (secção 4.3.1) do cimento-cola MCR_FCC12,5 tende a melhorar ou a manter-se muito próxima da do cimento-cola de referência (MCR_FCC0). Verificou-se um aumento nos ensaios de determinação da tensão de aderência após envelhecimento em água, e após tempo aberto de 20 e 30 minutos. O maior aumento ($0,21 \text{ N/mm}^2$) corresponde a este último ensaio. Nos restantes ensaios – aderência com cura normal e após envelhecimento por calor – a tensão de aderência diminuiu, tendo ocorrido a maior diminuição no ensaio após envelhecimento por calor ($0,12 \text{ N/mm}^2$)
- Em alguns ensaios de determinação da tensão de aderência (secção 4.3.1) – após envelhecimento em água e após tempo aberto de 20 e 30 minutos - o cimento-cola com 25% de FCC (MCR_FCC25) apresentou tensões de aderência superiores às do cimento-cola de referência e do imediatamente anterior (MCR_FCC12,5). Nestes ensaios a tensão de aderência máxima foi verificada para o cimento-cola MCR_FCC25
- Para os cimentos-cola com teores mais elevados de FCC, em concreto MCR_FCC37,5 e MCR_FCC50 os valores das tensões de aderência (secção 4.3.1) são inferiores ao do cimento-cola de referência MCR_FCC0 (exceto para MCR_FCC37,5 no ensaio de aderência após tempo aberto de 20 minutos em que o resultado é igual). O valor mais baixo em cada ensaio foi sempre relativo ao MCR_FCC50, tendo sido verificada a maior diferença em relação ao de referência no ensaio após tempo aberto de 30 minutos ($2,35 - 1,23 = 1,12$)
- Em cimentos-cola com teor de substituição de 12,5 e 37,5% regista-se uma melhoria da tensão de aderência (secção 4.3.1) com o aumento do tempo decorrido entre a aplicação do cimento-cola e a aplicação dos ladrilhos (para 20 minutos). No ensaio de aderência após tempo aberto de 20 minutos, os cimentos-cola MCR_FCC12,5, MCR_FCC25 e MCR_FCC37,5 aumentaram $0,12$, $0,09$ e $0,26 \text{ N/mm}^2$, respetivamente, face ao ensaio de aderência com cura normal
- Os modos de falha na rotura (secção 4.3.1) variaram em função do aumento do teor de FCC e com o tipo de envelhecimento. Nos ensaios após envelhecimento água verificou-se sempre o modo de falha AF-T, enquanto que nos restantes ensaios houve uma tendência para o modo de falha evoluir de CF-A para AF-t

com o aumento do teor de FCC. A maior quantidade de amostras com modo de rotura identificado como AF-T ocorreu sempre para o cimento-cola MCR_FCC50

- A capacidade de transferência do cimento-cola para o ladrilho tende a diminuir a partir dos 40 minutos e com o aumento do teor de FCC, ocorrendo com maior evidência para os cimentos-cola com 25% ou mais de teor de substituição de cimento por FCC (secção 4.3.2)
- A trabalhabilidade das misturas desta série também é diretamente afetada pelo aumento do teor de substituição de cimento por FCC. A perda de fluidez dos cimentos-cola ocorre sobretudo nas misturas com teores de FCC acima dos 12,5% (MCR_FCC25, MCR_FCC37,5 e MCR_FCC50) para as quais se verifica uma diminuição do escorregamento (secção 4.3.3)
- A deformabilidade dos cimentos-cola aumenta, não linearmente, com o aumento do teor de FCC. Embora não se registre um aumento sistemático em resultado do aumento do teor de FCC nas misturas, a tendência geral é a de que a deformabilidade aumente sendo que, mistura MCR_FCC50 apresenta uma deformabilidade superior à da mistura de referência em cerca de 50% (secção 4.3.4).
- Todos os cimentos-cola da série MCR_FCC – exceto o MCR_FCC50 no ensaio de aderência após imersão em água – cumprem os requisitos para que seja classificado como C2 ETS2 (cimento-cola melhorado com escorregamento reduzido, tempo aberto alargado e altamente deformável)

5.4. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A investigação desenvolvida ao longo da elaboração deste TFM não se encerra nas conclusões obtidas através do mesmo. Durante o seu desenvolvimento e após a análise dos resultados, surgiram várias questões que se apresentam neste subcapítulo como uma proposta de trabalhos a desenvolver futuramente no âmbito deste projeto:

- Repetir os ensaios para os cimentos-cola definidos neste trabalho, mas compensando a água absorvida pelo FCC. A quantidade de água absorvida pelo FCC (29% em massa) pode afetar não só a trabalhabilidade dos cimentos-cola no estado fresco como também os resultados dos ensaios realizados. É

importante reconhecer e quantificar a influência desta absorção de água no resíduo, e conseqüentemente avaliar da necessidade de compensação da água absorvida pelo FCC em cimento-cola. Os ensaios sobre os cimentos-cola com compensação de água poderão conduzir à constatação da viabilidade das misturas de cimento-cola com teores de FCC superiores.

- Após a execução do trabalho proposto no ponto anterior, ou como resultado das conclusões obtidas desse trabalho, realizar os mesmos ensaios, mas desta vez com as percentagens de substituição de cimento por FCC a variarem em incrementos mais pequenos e em torno da percentagem de substituição definida como ótima. Ou, em alternativa, fazer variar a percentagem de substituição, em incrementos mais pequenos, entre um máximo e um mínimo. No seguimento dos resultados obtidos neste trabalho, realizar uma campanha experimental em que os teores de substituição variem entre os 15 e os 22,5%, com incrementos de 2,5%, em ambas as séries.
- De forma a alargar o espetro de aplicação do trabalho desenvolvido, repetir a campanha experimental deste trabalho com misturas que reproduzam outros tipos de cimento-cola. O objetivo seria avaliar a influência destas substituições nos cimentos-cola de outros tipos comercializados pela CIARGA e a sua viabilidade visando a comercialização de produtos com estas novas formulações.
- Elaborar um plano de experiências fatorial (DoE – *design of experiments*) de forma a identificar as composições ideais dos cimentos-cola estudados. O objetivo é fazer variar o teor de mais componentes das misturas potenciando determinadas características do produto final em função de cada composição.

LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BAGANHA, GÓIS, MARQUES – O Setor da Construção Civil e Obras Públicas em Portugal: 1990-2000. Oficina do CES [Em linha]. 2002. [Consult. 16 ago. 2016]. Disponível em: <http://www.ces.uc.pt/publicacoes/oficina/ficheiros/173.pdf>
- [2] RUBENSTEIN, Madeleine - Emissions from the Cement Industry [Em linha]. 2012. [Consult. 16 ago. 2016]. Disponível em:
<<http://blogs.ei.columbia.edu/2012/05/09/emissions-from-the-cement-industry/>>
- [3] COSTA, Carla - Ligantes Hidráulicos. In Ciência e Engenharia de Materiais de Construção, M. Clara Gonçalves • Fernanda Margarido. Lisboa: ISTPress, 2012. 9789898481177. Pt. 1, p. 1-62.
- [4] COSTA, Carla e Rita Geada – Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera nas Propriedades Mecânicas de Argamassas. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS [Em linha]. 2012. [Consult. 17 ago. 2016]. Disponível em:
<http://www.apfac.pt/congresso2012/comunicacoes/Paper%2032_2012.pdf>
- [5] PACEWSKA, B.; WILINSKA, I.; BUKOWSKA, M.; NOCUN-WCZELIK, W. - Effect of waste aluminosilicate material on cement Hydration and properties of cement mortars. Cement and Concrete Research 32 (11) (2002) 1823-1830
- [6] PAYA, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; VELÁZQUEZ, S. - Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3RPortland cement pastes. Cement and Concrete Research 33(4) (2003) 603-609.
- [7] ZORNOZA, E. et al. – Compatibility of Fluid Catalytic Cracking Catalyst Residue (FC3R) with various types of cement. 3ª ed.: Advances in Cement Research v. 19, 2007. p 117-124.
- [8] PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; VELÁSQUEZ, S.; SORIANO, L.; SERNA, P.; RIGUEIRA, J. - Reusing of spent FCC Catalyst as a very reactive pozzolanic material: formulation of performance concretes [Em linha] (2004), p. 1-11 [Consult. 20 ago. 2016]. Disponível na internet:
< <https://www.researchgate.net/publication/237700206> >
- [9] CONCEIÇÃO, Maria Inês De Almeida Laginha - Reutilização de Catalisador exausto da Indústria Petroquímica em materiais à base de Cimento. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2011. Tese de mestrado.

LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [10] AFONSO, Daniela Alexandra Peixe - Efeito da Moagem do Catalisador Exausto de Cracking Catalítico nas Propriedades de Argamassas de Cimento. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2012. Tese de mestrado.
- [11] BRITO, Nuno João Pereira De - Efeito da Incorporação de Resíduo da Indústria Petrolífera na Durabilidade de Argamassas de Reparação de Estruturas de Betão. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2013. Tese de mestrado.
- [12] ANTUNES, Marilyne Junqueira - ECO-Betão com Adição de Resíduo da Indústria Petrolífera. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2013. Tese de mestrado.
- [13] PAIVA, Miguel Sobral de – ECO-Argamassas de Cal Hidráulica para Reabilitação de Edifícios. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2015. Dissertação de mestrado
- [14] STASIAK-BETLEJEWSKA, Renata; POTKÁNY, Marek - Construction Costs Analysis and its Importance to the Economy. 34:15 (2015) 35–42. doi: 10.1016/S2212-5671(15)01598-1.
- [15] CEM Bureau – Activity Report – 2015 [Em linha] [Consult. 27 ago. 2016]. Disponível na internet:
< <http://www.cembureau.eu/sites/default/files/AR2015.pdf>>
- [16] NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION - Concrete CO2 Fact Sheet. NRMCA Publication Number 2PCO2. 2012. pp. 1-13.
- [17] MIYATAKE Y., (1996) Technology development and sustainable construction, Journal of Management in Engineering, Vol. 12, No. 4, 1996, 23-27
- [18] IPCC - Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.(80 pp, 4.2 M, About PDF) Exit [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change
- [19] Kyoto Protocol To The United Nations Framework – Convention On Climate Change [Em linha]. (1998) [Consult. 27 ago. 2016]. Disponível na internet:
< <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>>
- [20] NATIONAL GEOGRAPHIC - Causes of Global Warming [Em linha]. [Consult. 27 ago. 2016]. Disponível na internet:
<http://environment.nationalgeographic.com/environment/global-warming/gw-causes/>>.

- [21] FELIXBERGER, Prof Josef K. - Polymer -Modified Thin -Bed Tile Adhesives. Ivd (2008) p. 1–109.
- [22] WORRELL, E. et al. – Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. 1^a.ed. v.26,2001. pp. 303-329
- [23] CIMPOR, CIMENTOS DE PORTUGAL, SGPS, S.A. Relatório de Sustentabilidade. Lisboa: [s.n.], 2011. p. 1-128.
- [24] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Adhesives for tiles – Requirements, evaluation of conformity, classification and designation. EN 12004:2007+A1:2012, May 2012.
- [25] SÁ, A. Margarida Vaz Duarte Oliveira e - Durabilidade de Cimentos-cola. Porto: Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005. Dissertação de Mestrado
- [26] NP EN 197-1 Abril 2001, Cimento – Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, Caparica: IPQ
- [27] BAYER, R., Lutz, H.: "Dry Mortars", in: Ullmann's "Encyclopedia of Industrial Chemistry", 6th Edition, Vol. 9 (2003) 1-26
- [28] PLANK, J. - Recent Developments in Dry Mortar Technology in Europe. [s.d.] 1–20.
- [29] RIVEIROS, David Abeal; GALICIA, Morteros De - Estudo de polímeros redispersíveis no desenvolvimento de adesivos cimentícios de alta deformabilidade. [Em linha]. 2008. [Consult. 01 set. 2016] Disponível na internet: <http://www.apfac.pt/congresso2012/comunicacoes/Paper%20118_2012.pdf>
- [30] AÏTCIN P-C. 2008. *Binders for Durable and Sustainable Concrete*. New York, USA, Taylor & Francis, 1st ed
- [31] SADEGHBEIGI, Reza - Fluid Catalytic Cracking Handbook. 3rd edition. USA: Elsevier, 2012. 352 p. - ISBN 9780123869654.
- [32] HEMLER, Charles L.; SMITH, Lester F. - Uop Fluid Catalytic Cracking Process. Handbook of Petroleum Refining Processes. May 1942 (2004) p. 47–70.
- [33] PAVOL, H. - FCC catalyst - Key element in refinery technology. 45th International Petroleum Conference. (2011) p. 1–11.

LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[34] FARAG, Ihab H.; TSAI, Kun-Yung - Simulation of fluid catalytic cracking operation. *Mathematical Modelling*. ISSN 02700255. 8:1987) 311–316. doi: 10.1016/0270-0255(87)90596-3.

[35] EUROPEAN CRACKING CATALYSTS PRODUCERS ASSOCIATION - FCC Equilibrium Catalyst (including FCC catalyst fines) ds safe reuse/rework outlets in Europe. Belgica – Bruxelas:European Chemical Industry Council, Janeiro 2006.

[36] ECMA – European Catalysts Manufacturers Association – Guidelines for the management of spent catalysts. CEFIC. Agosto 2001

<<http://www.cefic.org/Documents/Industry%20sectors/ECMA/ECMA%20GUIDELINES%20FOR%20THE%20MANAGEMENT%20OF%20SPENT%20CATALYSTS-201202.pdf>>

[37] GALP ENERGIA - Origem e composição do petróleo [Em linha], atual. 2014.

[Consult. 3 set. 2016]. Disponível na internet:

<<http://www.galpenergia.com/PT/agalpenergia/os-nossos-negocios/Exploracao-Producao/fundamentos-engenharia-petroleo/Paginas/Origem-e-composicao-do-petroleo.aspx>>.

[38] INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTION - An Introduction to Petroleum Refining and the Production of Ultra Low Sulfur Gasoline. 2011) 1–33.

<http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT05_Refining_Tutorial_FINAL_R1.pdf>

[39] GALP ENERGIA – Fabricação II [Em linha], atual. 2011. [Consult. 3 set. 2016].

Disponível na internet:

<<http://www.galpenergia.com/PT/agalpenergia/os-nossos-negocios/Refinacao-Distribuicao/ARL/Refinacao/RefinariaSines/Paginas/FabricacaoII.aspx>>.

[40] LEFFLER, W. L., *Petroleum Refining for the Non-Technical Person*, 2 ed.,

Oklahoma, Penn Well Publishers, 1985.

[41] ANDIÇ, RAMYAR, KORKUT – Effect of fly ash addition on the mechanical properties of tile adhesive – *Construction and Building Materials* [Em linha] Vol. 19, nº 17 (2005), p. 564-569 [Consult. 29 novembro 2016]. Disponível internet:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061805000188>>. 0950-0618

[42] LINHARES, Patricia Ferreira – Avaliação de ligantes minerais em

argamassas-cola. Aveiro: Universidade de Aveiro. 2011. Relatório de estágio para obtenção do grau de Mestre.

[43] NP EN 1348. Outubro 2000. Colas para ladrilhos – Determinação da resistência à tracção de cimentos-cola. Caparica: IPQ, p. 1-9

[44] EN 1347. Adhesives for tiles – Determination of wetting capability

[45] EN 1346. December 1996. Adhesives for tiles – Determination of open time

[46] EN 1308. September 1998. Adhesives for tiles – Determination of slip

[47] EN 12002. November 2002. Adhesives for tiles – Determination of transverse deformation for cementitious adhesives and grouts

[48] PETIT, Jean-Yves, WIRQUIN, Eric – Evaluation of various cellulose ethers performance in ceramic tile adhesive mortars. – International Journal of Adhesion and Adhesives [Em linha]. Vol. 40, (2013), p. 202-209 [Consult. 28 novembro 2016]. Disponível na internet:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749612001492>>. 0143-7496>.

[49] COSTA, CARLA, MARQUES, PAULO – Low-carbon cement with waste oil-cracking catalyst incorporation – IEEE (2012). 978-1-4673-0285-2/12

[50] JENNI, HOLZER, ZURBRIGGEN, HERWEGH – Influence of polymers on microstructure and adhesive strenght of cementitious tile adhesive mortars – Cement and Concrete Research [Em linha] Vol. 35, nº1 (2005), p. 35-50 [Consult. 29 novembro 2016]. Disponível na internet:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604003047>>. 0008-8846

[51] BUHLER, ZURBRIGGEN, PIELES, HUWILER, RASO – Dynamics of early skin formation of tiling mortars investigated by microscopy and diffuse reflectance infrared Fourier transformed spectroscopy – Cement and Concrete Composites [Em linha] Vol. 37, (2013), p. 161-170 [Consult. 2 dezembro 2016] Disponível na internet:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946512002168>>. 0958-9465

LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS


ANEXOS

ANEXO A - FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS


A.1 - CEM I 42,5 R

A.2 - FILLER CALCÁRIO

A.1 – CEM I 42,5 R



FICHA TÉCNICA

Cimento Portland CEM I 42,5 R


EN 197-1 0856

Constituintes

- Clinker ≥ 95%
- Constituintes adicionais minoritários ≤ 5%
- Sulfato de cálcio regulador de presa



Características

- Químicas**

 - Perda ao fogo (P.F.) ≤ 5,0%
 - Resíduo insolúvel (R.I.) ≤ 5,0%
 - Sulfatos (SO₃) ≤ 4,0%
 - Clorretos (Cl) ≤ 0,10%
- Físicas**

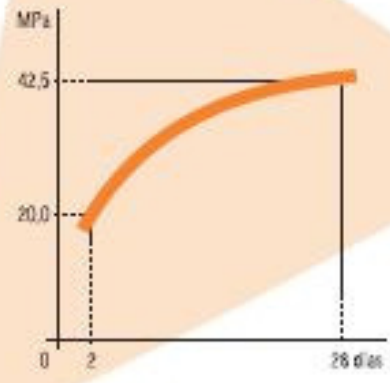
 - Início de presa (min) ≥ 60
 - Expansibilidade (mm) ≤ 10
- Mecânicas**

 - Resistência à compressão
 - Valores mínimos
 - 2 dias: 20,0 MPa
 - 28 dias: 42,5 MPa

Propriedades especiais do betão fabricado com este cimento


- ▶ Desenvolvimento rápido das resistências mecânicas
- ▶ Elevadas resistências a todas as idades
- ▶ Particularmente adequado para Classes de Exposição XC

Resistência mecânica à compressão
Curva de crescimento mínimo



Tempo (dias)	Resistência à compressão (MPa)
2	20,0
28	42,5

Cimento Portland
CEM I 42,5 R



▶ Utilizações recomendadas

- ▶ **Betão armado**
Indicado indistintamente para todas as classes de resistência com vantagem nas de C30/37 a C45/55
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



Pallette pletificada - Tara peraltada
72 Sacos de 25 kg = 1800 kg



Pallette
71 Sacos de 25 kg = 1775 kg

Camião de 25 toneladas com meios de descarga próprios devidamente selados



Granel
25 toneladas

▶ Precauções na aplicação

- ▶ Respeitar as dosagens de cimento mínimas e as relações água/cimento máximas normativas
- ▶ Assegurar uma cura e proteção adequadas de acordo com as disposições normativas
- ▶ Não retirar cofragem nem remover escoramento antes do betão ter a resistência suficiente
- ▶ Evitar tempos de transporte elevados no caso do betão pronto
- ▶ Betonagem em tempo quente e seco

▶ Contraindicações

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

▶ Ambiente e Segurança

- ▶ Usar vestuário de proteção, luvas e equipamento protetor para a vista/face adequados
- ▶ Quando ensacado contém redutor de crómio (VI). O seu período de validade é de dois meses após a data de ensacagem, sempre que se respeitarem as condições de armazenagem mencionadas no saco
- ▶ Para mais informações, consulte a Ficha de Dados de Segurança, disponível em www.cimpor-portugal.pt



uma empresa InterCement

SERVÍCIO COMERCIAL
Rua Almeida Faria, 35 - 1250-009 LISBOA
T: (+351) 21 311 81 00 - Fax: (+351) 21 311 82 21

SERVÍCIO TÉCNICO-COMERCIAL
Rua Almeida Faria, 35 - 1250-009 LISBOA
T: (+351) 21 311 81 00 - Fax: (+351) 21 311 82 21

SERVÍCIO DE CONTROLO DE QUANTAS E CARGO
Av. António Duarte - 5, Pedro Proa - 4425-004 SOUSA
T: (+351) 22 969 40 00 - Fax: (+351) 22 967 18 38


www.cimporportugal.pt
Doanacia@cimpor.com


F02_2014/01

A.2 – FILLER CALCÁRIO

Declaração de Desempenho

N.º DD-F-500001





Categoria identificação para os produtos

Filler Calcário - Alhandra

Classificação normativa

EN 12620:2002 + A1:2008
Agregado para betão

Fabricante

CARGOL, Argamassas Secas S.A.
Rua Alexandre Herculano, 25
1200-008, Lisboa
Portugal
www.cimporportugal.pt

Identificação do sistema e certificação da regularidade do sistema (RSTP)

Sistema 2º

Norma harmonizada

EN 12620:2002 + A1:2008

Organismo certificador


O organismo notificado CCR, realizou a certificação no âmbito do sistema 2º e emitiu o certificado de conformidade de controlo de produção em Lisboa n.º 0805-CPR-2010/02.0140.

Resumo técnico do produto

Características essenciais		Resumo técnico		Especificações técnicas harmonizadas	
Descrição pautográfica		Espalhamento superficial (base de referência) máx. em betão. Rocha esquelética calcária – Calcário		EN 12620:2002 + A1:2008 (Características avaliadas na máquina-prensa)	
Atividade de água		≤ 1,0%			
Massa volumétrica (Imprecisa/Seca-Saturada) (ρ ₁₅)		≥ 1500 kg/m ³			
Conteúdo sulfúrico		≤ 0,05%			
Teor total de sílica		≤ 0,04%			
Teor de H ₂ O ₂		Isento			
Permeio	Granulometria aparente (% acumulada)		Módulo (% passado acumulada)	Limites EN 12620:2002 + A1:2008 (% passado acumulada)	
	Retido	Passado		0%	100%
0,075 mm	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
0,150 mm	95 %	5 %	70 %	70 %	≥ 70 %
0,300 mm	90 %	10 %	85 %	85 %	≥ 85 %
0,600 mm	80 %	20 %	100 %	100 %	≥ 100 %
Libertação de substâncias perigosas		Ver Ficha de Dados de Segurança			

O desempenho do produto declarado acima está em conformidade com o sistema de classificação declarado. A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (CE) n.º 305/2011, sob a supervisão da autoridade competente para efeitos de aplicação do RSTP.

Assinado por e em nome do fabricante por: Júlio Vieira – Diretor Geral
Lisboa, 28/11/2015



Sinifício - Argamassas Secas S.A.
 Rua Alexandre Herculano, 25 | 1200-008 LISBOA | PORTUGAL | Tel. (351) 21 350 6100 | Fax. (351) 21 350 1361
 NIPC: 083 410 708
FABRICA S - Rua de Alameda N.º 13, Km 10,4 | 2900-470 ALHAMBRA | Tel. (351) 21 991 90 26 | Fax (351) 21 991 18 90
FABRICA J - Av. Américo Duarte | 4270-504 CRUZEIROS | Tel. (351) 22 969 87 10 | Fax (351) 22 969 87 20



ANEXO B - FICHAS COM RESULTADOS DOS ENSAIOS

- B.1 - MC_FCC0
- B.2 - MC_FCC12,5
- B.3 - MC_FCC25
- B.4 - MC_FCC37,5
- B.5 - MC_FCC50
- B.6 - MCR_FCC0
- B.7 - MCR_FCC12,5
- B.8 - MCR_FCC25
- B.9 - MCR_FCC37,5
- B.10 - MCR_FCC50

CIMENTOS-COLA COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLIFERA

B.1 – MC_FCC0

Designação:	MC_FCC0	Data da Colheita:	segunda-feira, 11 de abril de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio			
						09-05-2016			
Inicial - 28 dias									
kN	1.162	0.906	0.958	0.708	0.728	Observações			
	0.804	0.809							
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.46	0.36	0.38	0.28	0.29				
	0.32	0.32							
Aderência média:		0.33							
Após imersão em água									
kN	1.457	0.86	1.702	1.745	1.502			Observações	
	1.355	1.106	0.852						
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.58	0.34	0.68	0.70	0.60				
	0.54	0.44	0.34						
Aderência média:		0.54							
Após envelhecimento por aquecimento									
kN	0.254	0.156	0.225	0.200	0.248	Observações			
	0.218	0.184							
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.10	0.06	0.09	0.08	0.10				
	0.09	0.07							
Aderência média:		0.09							
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996									
kN	0.845	0.889	0.552	0.1228	1.073			20 minutos	Observações
	0.772	0.249	1.076	0.897					
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.34	0.36	0.22	0.05	0.43				
	0.31	0.10	0.43	0.36					
Aderência média:									
kN	1.31	0.787	0.831	0.88	0.97	30 minutos	Observações		
	0.949	0.797	0.81	1.003	1.406				
Padrão de rotura	CF-A	AF-T	AF-T	CF-A	CF-A				
	CF-A	AF-T	AF-T	CF-A	AF-T				
N/mm ²	0.52	0.31	0.33	0.35	0.39				
	0.38	0.32	0.32	0.40	0.56				
Aderência média:		0.35							

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio	
						11-04-2016	
Resultados individuais (mm)							
d ₀		d ₁		Deslizamento		Observações	
64.01	66.53	64.38	67.42	0.37	0.89		
Resultado (mm)							
Deslizamento médio:		0.63					

ANEXOS

B.2 – MC_FCC12,5

Designação:	MC_FCC12.5	Data da Colheita:	terça-feira, 26 de abril de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio			
						24-05-2016			
Inicial - 28 dias									
kN	0.902	0.795	0.631	1.299	1.133	Observações			
	0.935	1.033	0.581	0.67	0.847				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.36	0.32	0.25	0.52	0.45				
	0.37	0.41	0.23	0.27	0.34				
Aderência média:	0.36								
Após imersão em água									
kN	1.227	1.516	1.328	1.539	1.189			Observações	
	1.555	1.422	1.705	1.366	1.562				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.49	0.61	0.53	0.62	0.48				
	0.62	0.57	0.68	0.55	0.62				
Aderência média:	0.58								
Após envelhecimento por aquecimento									
kN	0.124	0.096	0.251	0.19	0.281	Observações			
	0.21	0.102	0.18	0.178	0.196				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.05	0.04	0.10	0.08	0.11				
	0.08	0.04	0.07	0.07	0.08				
Aderência média:	0.08								
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996									
kN	0.918	0.901	0.822	1.354	0.935			Observações	
	0.744	0.952	1.046	1.022	0.839				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.37	0.36	0.33	0.54	0.37				
	0.30	0.38	0.42	0.41	0.34				
Aderência média:	0.37								
kN	1.008	1.331	1.012	1.113	1.193	Observações			
	1.112	0.911	1.500	1.223	1.001				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.40	0.53	0.40	0.45	0.48				
	0.44	0.36	0.60	0.49	0.40				
Aderência média:	0.45								

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio			
						26-04-2016			
Resultados individuais (mm)									
d ₀		d ₁		Deslizamento		Observações			
51.24	52.09	51.60	53.18	0.36	1.09				
Resultado (mm)									
Deslizamento médio:								0.72	

B.3 MC_FCC25

Designação:	MC_FCC25	Data da Colheita:	segunda-feira, 2 de maio de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio			
						30-05-2016			
Inicial - 28 dias									
kN	0.552	0.508	0.477	0.640	0.609	Observações			
	0.928	0.461	0.583	0.450	0.883				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.22	0.20	0.19	0.26	0.24				
	0.37	0.18	0.23	0.18	0.35				
Aderência média:		0.23							
Após imersão em água									
kN	1.324	1.057	1.263	1.580	1.146			Observações	
	1.414	1.376	1.489	1.211	1.009				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.53	0.42	0.51	0.63	0.46				
	0.57	0.55	0.60	0.48	0.40				
Aderência média:		0.51							
Após envelhecimento por aquecimento									
kN	0.084	0.052	0.045	0.135	0.156	Observações			
	0.035	0.056	0.041	0.014	0.013				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.034	0.021	0.018	0.054	0.062				
	0.014	0.022	0.016	0.006	0.005				
Aderência média:									
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996									
kN	0.651	0.735	0.663	0.736	1.107			20 minutos	Observações
	0.784	0.609	0.951	1.137	0.859				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.26	0.29	0.27	0.29	0.44				
	0.31	0.24	0.38	0.45	0.34				
Aderência média:									
kN	0.677	0.842	1.004	0.797	0.847	30 minutos	Observações		
	0.728	0.658	0.880	0.679	1.153				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.27	0.34	0.40	0.32	0.34				
	0.29	0.26	0.35	0.27	0.46				
Aderência média:									

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio	
						02-05-2016	
Resultados individuais (mm)							
d ₀		d ₁		Deslizamento		Observações	
60.93	61.55	61.43	61.80	0.50	0.25		
Resultado (mm)							
Deslizamento médio:		0.38					

ANEXOS

B.4 – MC_FCC37,5

Designação:	MC_FCC25	Data da Colheita:	segunda-feira, 9 de maio de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio			
						30-05-2016			
Inicial - 28 dias									
kN	0.312	0.510	0.520	0.426	0.389	Observações			
	0.589	0.692	0.685	0.599	0.536				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.12	0.20	0.21	0.17	0.16				
	0.24	0.28	0.27	0.24	0.21				
Aderência média:									
Após imersão em água									
kN	0.990	0.866	1.151	1.029	0.734			Observações	
	1.273	0.880	0.768	1.037	0.822				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.40	0.35	0.46	0.41	0.29				
	0.51	0.35	0.31	0.41	0.33				
Aderência média:									
Após envelhecimento por aquecimento									
kN	0.142	0.119	0.014	0.081	0.134	Observações			
	0.057	0.168	0.148	0.139	0.173				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.0568	0.0476	0.0056	0.0324	0.0536				
	0.0228	0.0672	0.0592	0.0556	0.0692				
Aderência média:									
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996									
kN	0.765	0.842	0.720	0.657	0.880			Observações	
	0.649	1.134	0.954	0.737	0.867				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.31	0.34	0.29	0.26	0.35				
	0.26	0.45	0.38	0.29	0.35				
Aderência média:						20 minutos			
kN	0.781	0.888	0.850	0.955	0.747	Observações			
	0.488	0.268	0.927	0.617	0.653				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.31	0.36	0.34	0.38	0.30				
	0.20	0.11	0.37	0.25	0.26				
Aderência média:								30 minutos	

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio			
						09-05-2016			
Resultados individuais (mm)									
d ₀	d ₁		Deslizamento			Observações			
58.33	59.21	58.84	59.45	0.51	0.24				
Resultado (mm)									
Deslizamento médio:								0.38	

B.5 – MC_FCC50

Designação:	MC_FCC50	Data da Colheita:	segunda-feira, 18 de abril de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio			
						16-05-2016			
Inicial - 28 dias									
kN	0.409	0.373	0.514	0.544	0.385	Observações			
	0.382	0.372	0.498	0.355	0.498				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.16	0.15	0.21	0.22	0.15				
	0.15	0.15	0.20	0.14	0.20				
Aderência média:									
Após imersão em água									
kN	0.279	0.424	0.345	0.271	0.592			Observações	
	0.383	0.505	0.319	0.328	0.398				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.11	0.17	0.14	0.11	0.24				
	0.15	0.20	0.13	0.13	0.16				
Aderência média:									
Após envelhecimento por aquecimento									
kN	0.048	0.02	0.072	0.046	0.033	Observações			
	0.033	0.026	0.033	0.094	0.11				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01				
	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04				
Aderência média:									
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996									
kN	0.710	0.624	0.649	0.602	0.451			Observações	
	0.710	0.434	0.725	0.578	0.630				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.28	0.25	0.26	0.24	0.18				
	0.28	0.17	0.29	0.23	0.25				
Aderência média:									
kN	0.463	0.439	0.532	0.523	0.465	Observações			
	0.451	0.779	0.533	0.667	0.555				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.19	0.18	0.21	0.21	0.19				
	0.18	0.31	0.21	0.27	0.22				
Aderência média:									

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio	
						18-04-2016	
Resultados individuais (mm)							
d ₀		d ₁		Deslizamento		Observações	
65.11	63.72	65.39	63.99	0.28	0.27		
Resultado (mm)							
Deslizamento médio:		0.28					

B.6 – MCR_FCC0

Designação:	MCR_FCC0	Data da Colheita:	segunda-feira, 16 de maio de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio	
						13-06-2016	
Inicial - 28 dias						Observações	
kN	5.665	6.054	5.404	6.350	6.567		
	4.248	6.062	5.610	6.799	6.007		
Padrão de rotura	AF-T	CF-S	AF-T	AF-T	AF-T		
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
N/mm ²	2.27	2.42	2.16	2.54	2.63		
	1.70	2.42	2.24	2.72	2.40		
Aderência média:							
Após imersão em água						Observações	
kN	1.977	1.739	1.983	2.151	2.388		
	1.937	2.381	2.408	2.259	3.089		
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
N/mm ²	0.79	0.70	0.79	0.86	0.96		
	0.77	0.95	0.96	0.90	1.24		
Aderência média:							
Após envelhecimento por calor						Observações	
kN	5.919	3.913	5.664	5.372	6.063		
	5.373	6.018	5.611	6.438	6.398		
Padrão de rotura	CF-A	AF-T	CF-A	CF-A	CF-A		
	CF-A	CF-A	AF-T	CF-A	CF-A		
N/mm ²	2.37	1.57	2.27	2.15	2.43		
	2.15	2.41	2.24	2.58	2.56		
Aderência média:							
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996						Observações	
kN	6.050	5.356	6.168	5.325	5.607		
	6.682	4.881	5.147	6.185	5.075		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
	CF-A	AF-T	AF-T	CF-A	AF-T		
N/mm ²	2.42	2.14	2.47	2.13	2.24		
	2.67	1.95	2.06	2.47	2.03		
Aderência média:							20 minutos
kN	5.924	5.570	5.024	3.749	5.685		
	7.291	6.977	5.624	4.953	7.132		
Padrão de rotura	CF-A	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
	CF-A	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
N/mm ²	2.37	2.23	2.01	1.50	2.27		
	2.92	2.79	2.25	1.98	2.85		
Aderência média:						30 minutos	

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio
						16-05-2016
Resultados individuais (mm)						Observações
d ₀	d ₁		Deslizamento			
64.78	67.15	65.34	67.40	0.56	0.25	
Resultado (mm)						
Deslizamento médio: 0.41						

Deformação Transversal EN 12002						Data do ensaio
						13-06-2016
Resultados individuais (mm)						Observações
d ₁	d ₂		d ₃			
7.67	6.59		6.36			
Resultado (mm)						
Deformabilidade média: 6.87						

B.7 – MCR_FCC12,5

Designação:	MCR_FCC12.5	Data da Colheita:	segunda-feira, 23 de maio de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio	
						20-06-2016	
Inicial - 28 dias							
kN	6.010	5.968	5.909	5.807	5.527	Observações	5.252 5.123
	5.650	5.979	6.004	5.640	5.938		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	BT		
	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
N/mm ²	2.40	2.39	2.36	2.32	2.21		
	2.26	2.39	2.40	2.26	2.38		
Aderência média:							
Após imersão em água							
kN	2.465	2.074	2.233	2.286	2.338	Observações	1.925
	2.546	2.722	2.742	2.855	2.831		
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
N/mm ²	0.99	0.83	0.89	0.91	0.94		
	1.02	1.09	1.10	1.14	1.13		
Aderência média:							
Após envelhecimento por calor							
kN	5.978	5.969	4.979	5.470	5.978	Observações	Em alguns ensaios, sobretudo na primeira placa, é possível notar alguma AF-S
	5.210	5.117	4.155	6.067	5.384		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
N/mm ²	2.39	2.39	1.99	2.19	2.39		
	2.08	2.05	1.66	2.43	2.15		
Aderência média:							
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996							
kN	6.333	6.522	6.438	5.045	6.095	20 minutos	A figura de rotura predominante é a CF-A, embora em alguns ensaios se verificasse também AF-T e AF-S de forma menos evidente
	5.522	6.371	6.206	5.819	7.056		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	BT	AF-T	CF-A		
	AF-T	AF-T	CF-A	CF-A	CF-A		
N/mm ²	2.53	2.61	2.58	2.02	2.44		
	2.21	2.55	2.48	2.33	2.82		
Aderência média:							
kN	7.766	5.847	6.718	5.253	4.997	30 minutos	Figura de rotura predominante é CF-A, sempre com alguma AF-T. Em dois dos ensaios verificou-se a situação inversa
	4.972	6.142	6.319	6.869	6.809		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	CF-A	CF-S	AF-T		
	AF-T	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
N/mm ²	3.11	2.34	2.69	2.10	2.00		
	1.99	2.46	2.53	2.75	2.72		
Aderência média:							

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio	
						23-05-2016	
Resultados individuais (mm)							
d ₀		d ₁		Deslizamento		Observações	
54.73	57.41	55.04	57.92	0.31	0.51		
Resultado (mm)							
Deslizamento médio:						0.41	

Deformação Transversal EN 12002						Data do ensaio	
						20-06-2016	
Resultados individuais (mm)							
d ₁		d ₂		d ₃		Observações	
8.24		5.79		5.64			
Resultado (mm)							
Deformabilidade média:						6.56	

B.8 – MCR_FCC25

Designação:	MCR_FCC25	Data da Colheita:	segunda-feira, 30 de maio de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio	
						27-06-2016	
Inicial - 28 dias							
kN	5.722	6.187	6.167	5.686	6.136	Observações	
	5.685	5.111	5.785	4.775	6.313		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
N/mm ²	2.29	2.47	2.47	2.27	2.45		
	2.27	2.04	2.31	1.91	2.53		
Aderência média:							
Após imersão em água							
kN	2.757	2.499	3.031	2.809	2.839		Observações
	2.68	2.507	3.113	3.335	2.372		
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
N/mm ²	1.10	1.00	1.21	1.12	1.14		
	1.07	1.00	1.25	1.33	0.95		
Aderência média:							
Após envelhecimento por calor							
kN	5.159	5.577	5.968	5.855	6.518	Observações	
	5.838	6.109	5.377	4.621	6.799		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	AF-T	AF-T	CF-A		
	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
N/mm ²	2.06	2.23	2.39	2.34	2.61		
	2.34	2.44	2.15	1.85	2.72		
Aderência média:							
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996							
kN	6.172	5.197	5.963	5.505	6.199		Observações
	6.731	5.801	5.897	6.242	6.033		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	CF-A	AF-T	AF-T		
	CF-A	CF-A	CF-A	AF-T	CF-A		
N/mm ²	2.47	2.08	2.39	2.20	2.48		
	2.69	2.32	2.36	2.50	2.41		
Aderência média:							
kN	7.962	5.618	7.473	6.927	7.016	Observações	
	7.146	5.323	6.498	5.888	7.133		
Padrão de rotura	AF-T	CF-A	CF-S	CF-A	CF-A		
	AF-T	CF-A	CF-A	CF-A	AF-T		
N/mm ²	3.18	2.25	2.99	2.77	2.81		
	2.86	2.13	2.60	2.36	2.85		
Aderência média:							

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio
						30-05-2016
Resultados individuais (mm)						
d ₀	d ₁		Deslizamento			Observações
61.72	56.7	61.98	56.98	0.26	0.28	
Resultado (mm)						
Deslizamento médio: 0.27						

Deformação Transversal EN 12002						Data do ensaio
						27-06-2016
Resultados individuais (mm)						
d ₁	d ₂		d ₃			Observações
-	8.73		7.13			
Resultado (mm)						
Deformabilidade média: 7.93						

B.9 – MCR_FCC37,5

Designação:	MCR_FCC37.5	Data da Colheita:	segunda-feira, 6 de junho de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio	
						04-07-2016	
Inicial - 28 dias							
kN	4.776	5.634	4.781	5.243	5.341	Observações	
	5.003	5.064	5.663	4.141	4.408		
Padrão de rotura	AF-T	CF-A	CF-A	AF-T	CF-A		
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
N/mm ²	1.91	2.25	1.91	2.10	2.14		
	2.00	2.03	2.27	1.66	1.76		
Aderência média:							
Após imersão em água							
kN	2.228	2.145	2.591	2.766	2.323	Observações	Na 2ª placa, em 2 ensaios, a figura de rotura apresentava alguma CF-A
	2.803	2.492	2.369	2.259	2.629		
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
N/mm ²	0.89	0.86	1.04	1.11	0.93		
	1.12	1.00	0.95	0.90	1.05		
Aderência média:							
Após envelhecimento por aquecimento							
kN	4.803	4.718	4.416	5.675	6.085	Observações	
	4.645	5.101	4.826	3.578	4.886		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
N/mm ²	1.92	1.89	1.77	2.27	2.43		
	1.86	2.04	1.93	1.43	1.95		
Aderência média:							
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996							
kN	6.008	5.516	5.151	5.939	6.647	Observações	Em alguns dos ensaios a figura de rotura apresentava alguma CF-A
	5.429	5.522	5.217	5.734	5.272		
Padrão de rotura	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A	CF-A		
	AF-T	CF-A	CF-A	CF-A	AF-T		
N/mm ²	2.40	2.21	2.06	2.38	2.66		
	2.17	2.21	2.09	2.29	2.11		
Aderência média:							
kN	5.357	4.789	6.176	5.428	5.177	Observações	
	4.903	4.857	5.305	4.582	5.346		
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T		
N/mm ²	2.14	1.92	2.47	2.17	2.07		
	1.96	1.94	2.12	1.83	2.14		
Aderência média:							

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio	
						06-06-2016	
Resultados individuais (mm)							
d ₀		d ₁		Deslizamento		Observações	
64.83	63.48	65.06	63.67	0.23	0.19		
Resultado (mm)							
Deslizamento médio:						0.21	

Deformação Transversal EN 12002						Data do ensaio	
						04-07-2016	
Resultados individuais (mm)							
d ₁		d ₂		d ₃		Observações	
7.9		7.35		-			
Resultado (mm)							
Deformabilidade média:						7.63	

B.10 – MCR_FCC50

Designação:	MCR_FCC50	Data da Colheita:	segunda-feira, 13 de junho de 2016
Nº Amostra:	1/1	Observações:	

Aderência - NP EN 1348:2000						Data do ensaio			
						11-07-2016			
Inicial - 28 dias									
kN	3.027	3.362	3.698	3.494	3.579	Observações			
	3.282	3.741	3.695	3.195	3.601				
Padrão de rotura	CF-A	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	1.21	1.34	1.48	1.40	1.43				
	1.31	1.50	1.48	1.28	1.44				
Aderência média:									
Após imersão em água									
kN	1.513	1.785	1.579	0.947	1.787			Observações	
	1.221	1.473	1.902	1.699	1.665				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	0.61	0.71	0.63	0.38	0.71				
	0.49	0.59	0.76	0.68	0.67				
Aderência média:									
Após envelhecimento por aquecimento									
kN	3.239	2.849	3.437	2.496	2.918	Observações			
	2.754	2.872	3.622	3.093	3.482				
Padrão de rotura	AF-T	CF-A	AF-T	CF-A	AF-T				
	CF-A	CF-A	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	1.30	1.14	1.37	1.00	1.17				
	1.10	1.15	1.45	1.24	1.39				
Aderência média:									
Tempo de aberto - EN NP 1346:1996									
kN	3.670	3.375	3.380	3.350	3.299			Observações	
	3.257	3.541	3.978	3.013	4.451				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	1.47	1.35	1.35	1.34	1.32				
	1.30	1.42	1.59	1.21	1.78				
Aderência média:									
kN	3.377	3.430	3.375	3.903	4.080	Observações			
	3.492	2.556	3.628	3.422	3.233				
Padrão de rotura	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T	AF-T				
	AF-T	CF-A	AF-T	AF-T	AF-T				
N/mm ²	1.35	1.37	1.35	1.56	1.63				
	1.40	1.02	1.45	1.37	1.29				
Aderência média:									

Deslizamento EN NP 1308:1998						Data do ensaio			
						13-06-2016			
Resultados individuais (mm)									
d ₀		d ₁		Deslizamento		Observações			
62.73	64.22	62.9	64.41	0.17	0.19				
Resultado (mm)									
Deslizamento médio:								0.18	

Deformação Transversal EN 12002						Data do ensaio			
						11-07-2016			
Resultados individuais (mm)									
d ₁		d ₂		d ₃		Observações			
-		10.13		10.94					
Resultado (mm)									
Deformabilidade média:								10.54	

ANEXO C - FOTOGRAFIAS DAS AMOSTRAS DO ENSAIO DE MOLHABILIDADE

- C.1 - MC_FCC0
- C.2 - MC_FCC12,5
- C.3 - MC_FCC25
- C.4 - MC_FCC37,5
- C.5 - MC_FCC50
- C.6 - MCR_FCC0
- C.7 - MCR_FCC12,5
- C.8 - MCR_FCC25
- C.9 - MCR_FCC37,5
- C.10 - MCR_FCC50

C.1 – MC_FCC0



C.2 MC_FCC12,5



ANEXOS

C.3 – MC_FCC25



C.4 – MC_FCC37,5



C.iv

C.5 MC_FCC50



C.6 MCR_FCC0



C.7 – MCR_FCC12,5



ANEXOS

C.8 MCR_FCC25



C.9 MCR_FCC37,5



C.10 MCR_FCC50

