



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**

**ISEL**

## **Produção de argamassas de cimento com incorporação de um resíduo da refinação de petróleo**

**RITA GEADA FAUSTINO**  
Licenciada em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Área de Especialização  
em Edificações

**Orientadora:**

Doutor, Carla Maria Duarte Costa, Prof. Coordenador (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa)

**Júri:**

Presidente: Doutor, João Alfredo Ferreira dos Santos, Prof. Coordenador (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa)

Arguente: Licenciado, João Pereira, Cimpor Tec

Doutor, Maria Ana Carvalho Viana Baptista, Prof. Coordenador (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa)

**Dezembro de 2011**





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**

**ISEL**

## **Produção de argamassas de cimento com incorporação de um resíduo da refinação de petróleo**

**RITA GEADA FAUSTINO**  
Licenciada em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Área de Especialização  
em Edificações

**Orientadora:**

Doutor, Carla Maria Duarte Costa, Prof. Coordenador (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa)

**Júri:**

Presidente: Doutor, João Alfredo Ferreira dos Santos, Prof. Coordenador (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa)

Arguente: Licenciado, João Pereira, Cimpor Tec

Doutor, Maria Ana Carvalho Viana Baptista, Prof. Coordenador (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa)

**Dezembro de 2011**



## RESUMO

### **Produção de argamassas de cimento com incorporação de um resíduo da refinação de petróleo**

A indústria cimenteira é um dos sectores que mais contribui para um elevado impacto ambiental. O processo de produção de cimento requer a utilização de grandes quantidades de recursos naturais, é energeticamente intensivo e emite elevadas taxas de dióxido de carbono para a atmosfera.

Com o presente estudo pretendeu-se contribuir para a mitigação do impacto ambiental provocado pelo processo de fabrico do cimento estudando a viabilidade da substituição parcial de cimento por um material com propriedades cimentícias. O material cimentício estudado foi um resíduo da indústria da refinação de petróleo, em concreto, o catalisador exausto produzido na unidade de “cracking” catalítico (FCC) da refinaria da Petrogal, em Sines.

Na prossecução do objectivo deste trabalho prepararam-se misturas de cimento com teores de incorporação catalisador exausto de FCC de 5, 10, 15, 20, 25 e 30%, em massa, para avaliar o efeito do teor do resíduo incorporado em propriedades reológicas e mecânicas de argamassas, em função do tempo de hidratação. Pretendeu-se, ainda, avaliar se as misturas de cimento com incorporação do resíduo correspondem às especificações requeridas pela norma europeia em vigor (NP EN 197-1:2001).

Numa segunda fase do trabalho estudou-se uma mistura ternária composta por cimento, resíduo de catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural.

Em função da sua composição, foram produzidas quatro séries diferentes de argamassas:

- Argamassas de referência que incluem na sua composição cimento, areia e água (de acordo com a NP EN 196-1:2006);
- Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC tal como foi recebido da refinaria (misturas binárias);
- Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído (misturas binárias); e,
- Argamassas com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural (misturas ternárias).

Todas estas argamassas foram elaboradas adoptando um procedimento experimental que se baseia no descrito na norma NP EN 196-1:2006.

Ao longo da campanha experimental, as argamassas foram sujeitas a ensaios no estado fresco e ensaios no estado endurecido, em diferentes tempos de hidratação, para determinar algumas propriedades físicas e mecânicas, respectivamente. As argamassas de referência e as misturas

binárias foram ensaiadas aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias e as misturas binárias foram ensaiadas aos 2, 7 e 28 dias. No estado fresco realizaram-se ensaios de determinação da consistência por espalhamento, determinação da massa volúmica e ensaios de teor em ar. No estado endurecido foram determinadas as resistências à flexão e à compressão.

Da análise dos resultados pode-se inferir que o resíduo de catalisador exausto de FCC apresenta actividade pozolânica, de tal forma que, argamassas com teores de substituição de cimento por este resíduo até 15% (com adição de superplastificante) estão conforme a norma NP EN 197-1:2001 no que respeita à resistência à compressão, em todos os tempos de hidratação especificados. Relativamente às misturas ternárias, verificou-se que conforme a norma NP EN 197-1:2001, o cimento pode ser substituído pelos dois resíduos em simultâneo até 20%. Verificou-se ainda que utilizando qualquer um dos resíduos com superplastificante, este teor poderia aumentar até 30%.

**PALAVRAS-CHAVE:** reutilização de resíduos industriais, materiais de base cimentícia, mitigação impactos ambientais, resíduo de catalisador exausto de FCC, resíduo de pedra natural.

## ABSTRACT

The cement production is a process with a high environmental impact, particularly because it requires the use of significant amounts of natural resources is energy-intensive and emits high levels of CO<sub>2</sub> into the atmosphere.

The present study aims to contribute to the mitigation of environmental impact caused by the cement production process, studying the feasibility of partial replacement of cement by a material with cementitious properties. The cementitious material studied is a residue of petroleum refining industry, namely, the catalyst produced in the exhaust "cracking" catalytic unit (FCC) from Petrogal refinery in Sines.

To achieve the goal of this work, mortars of cement with incorporation of FCC exhaust catalyst with levels of 5, 10, 15, 20, 25 and 30% by mass, were prepared to evaluate the effect of waste content incorporated incorporation on the rheological properties and mechanical properties of mortars, as a function of hydration time. It was intended to also evaluate whether the cement mixtures with incorporated residue correspond to the specifications required by current European Standard (EN 197-1:2001).

In a second phase of this work, a ternary mixture composed of cement, waste FCC and waste natural stone was studied.

Depending on its composition, four different series of mortars has been produced:

- Reference mortars, including on its composition cement, sand and water (according to NP EN 196-1:2006);
- Mortars with partial replacement of cement by waste FCC as received from the refinery in Sines (binary mixtures);
- Mortars with partial replacement of cement by grounded waste FCC (binary mixtures); and
- Mortars with partial replacement of cement by waste FCC and waste natural stone (ternary mixtures)

All of these mortars were prepared adopting an experimental procedure based on the standard NP EN 197-1:2006.

During the experimental campaign, mortars were tested in fresh state and hardened state at different times of hydration, to determine some physical and mechanical properties, respectively.

The reference mortar and binary mixtures were tested at 2, 7, 28, 56 and 90 days and the binary mixtures were tested at 2, 7 and 28 days. On fresh state, tests were performed to determine the consistency (by flow table), density and air content.

It was concluded that the waste FCC catalyst has pozzolanic activity, so that mortars with 15% of cement replacement levels by this residue are consistent to the standard NP EN 197-1:2001 with respect to compressive strength at all hydration times specified.

In ternary mixtures, it was observed that according to standard NP EN 197-1:2001, cement may be replaced by two wastes simultaneously up to 20%. It was also observed that using any of the waste with superplasticizer, this level could increase by 30%.

**KEYWORDS:** reuse of industrial waste, cementitious materials, environmental impacts reduction, waste FCC, waste natural stone.

## AGRADECIMENTOS

A elaboração desta dissertação não seria possível sem a intervenção e apoio de diversas pessoas e entidades às quais gostaria de manifestar o meu sincero agradecimento:

À Professora Doutora Carla Costa expresso o meu profundo agradecimento pela orientação, que largamente excedeu o campo científico, e pela sua compreensão, entusiasmo, disponibilidade e preocupação sempre manifestada, pelos conhecimentos transmitidos, pelas suas valiosas sugestões, pela disponibilidade e pela revisão atenta da dissertação.

Agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) os recursos disponibilizados que permitiram a concretização desta dissertação, através do projecto de investigação Ref.<sup>a</sup> PTDC/ECM/113115/2009, “ECO-Zement: Reutilização do resíduo de “cracking” catalítico em leito fluidizado da refinação de petróleo em materiais de base cimentícia”

À CIMPOR, à PETROGAL, à SIFUCEL e à GESTIN agradeço os recursos disponibilizados para este trabalho.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa por todos os meios que disponibilizaram para a realização da campanha experimental.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção pela sua ajuda e prestabilidade, mesmo em horário pós-laboral, no trabalho realizado no laboratório.

Por último, não posso deixar de manifestar o meu apreço por aqueles que de uma ou outra forma contribuíram para debater ideologias que me ajudaram a formular determinadas ideias deste documento.



## ÍNDICE DO TEXTO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento do Tema .....	1
1.2	Objectivos do trabalho .....	2
1.3	Abordagem metodológica .....	2
1.4	Estrutura do trabalho.....	3
2	ESTADO DA ARTE .....	5
2.1	Indústria do cimento.....	5
2.1.1	Processo de fabrico cimento .....	5
2.1.2	Impacto ambiental .....	7
2.1.3	Medidas de mitigação do impacto ambiental .....	10
2.2	Cimentos correntes .....	12
2.2.1	Definição, composição e normalização .....	12
2.2.1.1	Principais constituintes do clínquer .....	15
2.2.2	Hidratação .....	16
2.3	Resíduo da refinação de petróleo enquanto substituto parcial do cimento.....	18
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	23
3.1	Introdução .....	23
3.2	Materiais utilizados.....	26
3.2.1	Cimento.....	26
3.2.2	Superplastificante .....	27
3.2.3	Água.....	27
3.2.4	Areia.....	27
3.2.5	Resíduo de catalisador exausto de FCC.....	28
3.2.6	Resíduo de pedra natural .....	30
3.3	Preparação das argamassas .....	31
3.4	Ensaio no estado fresco.....	34
3.4.1	Ensaio para determinar a consistência das argamassas: Mesa de espalhamento ...	34
3.4.2	Massa volúmica .....	36
3.4.3	Ensaio de teor em ar .....	37

3.5	Moldagem e Compactação.....	39
3.6	Desmoldagem, pesagem e identificação.....	42
3.7	Ensaio no estado endurecido .....	43
3.7.1	Determinação das resistências mecânicas.....	43
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	47
4.1	Ensaio no estado fresco .....	48
4.1.1	Consistência por espalhamento.....	48
4.1.1.1	Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC.....	48
4.1.1.2	Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído	50
4.1.1.3	Argamassas com incorporação simultânea de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural .....	52
4.1.2	Massa volúmica.....	56
4.1.2.1	Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC.....	57
4.1.2.2	Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído	58
4.1.2.3	Argamassas com incorporação simultânea de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural .....	61
4.1.3	Teor em ar.....	63
4.1.3.1	Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC.....	64
4.1.3.2	Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído	65
4.1.3.3	Argamassas com incorporação simultânea de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural .....	67
4.2	Ensaio no estado endurecido .....	71
4.2.1	Resistência à flexão .....	72
4.2.1.1	Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC.....	72
4.2.1.2	Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído	74
4.2.1.3	Argamassas com incorporação simultânea de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural .....	76
4.2.2	Resistência à compressão .....	80

4.2.2.1 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC .....	81
4.2.2.2 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído 84	
4.2.2.3 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural .....	86
5 CONCLUSÕES .....	91
Perspectivas de Trabalhos futuros .....	96
BIBLIOGRAFIA.....	99
ANEXOS .....	105



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema do processo de fabrico do cimento [7].	6
Figura 2.2 – Distribuição das emissões verificadas no ano de 2010 por sector de actividade [9].	8
Figura 2.3 – Produção de cimento estimada até ao ano 2050 [10].	9
Figura 2.4 – Objectivos definidos para a indústria do cimento em termos de redução das emissões de CO <sub>2</sub> ao longo do tempo até 2050 e o contributo de cada uma das alavancas estabelecidas para a mitigação deste gás[13].	11
Figura 2.5 – Constituintes de um cimento CEM.	12
Figura 2.6 – Cinco tipos principais de cimento CEM.	13
Figura 2.7 – Consumo dos vários tipos de cimentos na Europa ao longo do tempo [16].	14
Figura 2.8 – Imagem de microscopia electrónica de varrimento, obtida em modo de electrões secundário (JEOL JSM 7001F, das partículas dos catalisadores exaustos da unidade de FCC da refinaria da Petrogal em Sines[25].	19
Figura 3.1 – Resumo esquemático das argamassas preparadas (SP – superplastificante; rFCC – resíduo de FCC tal como foi recebido; rFCCm – resíduo de FCC moído; rPN – resíduo de pedra natural).	24
Figura 3.2 – Distribuição cumulativa de tamanho de partículas do cimento e do resíduo de catalisador de FCC [37].	29
Figura 3.3 – Curva de solubilidade do calcário [37]	30
Figura 3.4 – Distribuição cumulativa de tamanho de partículas do cimento e do resíduo de pedra natural [46].	31
Figura 3.5 – Recipiente e pá misturadora típicos [39].	32
Figura 3.6 – Esquema dos tempos e sequência de introdução dos constituintes, em cada amassadura.	34
Figura 3.7 – Esquema [41] da mesa de espalhamento e fotografia da mesa de espalhamento utilizada neste estudo.	35
Figura 3.8 – Equipamento do ensaio da mesa de espalhamento.	36
Figura 3.9 – Equipamento de ensaio de determinação do teor em ar	38
Figura 3.10 – Esquema com dimensões dos moldes e espátula grande e espátula pequena [39].	40
Figura 3.11 – Molde (A) e moldagem (B) dos provetes.	41
Figura 3.12 – Esquema com dimensões do compactador (dimensões em milímetros) [40].	41
Figura 3.13 – Compactador dos provetes, com prolonga que é colocada no compactador.	42
Figura 3.14 – Provetes depois de desmoldados (A e B) e identificados (B).	42
Figura 3.15 – Armazenagem dos provetes em água.	43
Figura 3.16 – Esquema com dimensões do equipamento de ensaio à flexão e posicionamento do provete nos cilindros deste equipamento [40].	44

Figura 3.17 – Equipamento de ensaio para determinar resistência dos provetes à flexão (A) e provetes depois de ensaiados (B). .....	45
Figura 3.18 – Equipamento para o ensaio de determinação da resistência à compressão.....	46
Figura 3.19 – Provetes depois de ensaiados (A) e excicador (B) onde os provetes são guardados depois de ensaiados. ....	46
Figura 4.1 – Representação gráfica dos valores de consistência (em milímetros) obtidos no ensaio de mesa de espalhamento das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial, entre 5 e 30%, de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (rFCC). ....	49
Figura 4.2 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento comparando as argamassas com substituição parcial de 5 e 30% de cimento por resíduo de FCC moídos com as argamassas de referência sem incorporação de resíduo. ....	51
Figura 4.3 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento, comparando as argamassas com substituição parcial de 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência. ....	52
Figura 4.4 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento para as argamassas de referência e para as argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, sem introdução de superplastificante (SP). ....	54
Figura 4.5 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento para as argamassas de referência e para as argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, com introdução de superplastificante (SP). ....	55
Figura 4.6 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) dos ensaios obtidos no ensaio de mesa de espalhamento (reproduzidos da Figura 4.1 e Figura 4.5), comparando resultados obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento para as argamassas de referência, para as argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN e para as argamassas com 10% de substituição parcial de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP). ....	56
Figura 4.7 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC (tal como recebido da refinaria). ....	57
Figura 4.8 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído. ....	59

Figura 4.9 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica, comparando as argamassas com substituição de 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.....	60
Figura 4.10 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, sem superplastificante (SP).....	61
Figura 4.11 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, com superplastificante (SP).....	62
Figura 4.12 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica (reproduzidos da Tabela 4.10 e Tabela 4.6), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN e das argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP). .....	63
Figura 4.13 – Representação gráfica dos resultados de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como recebido da refinaria). .....	65
Figura 4.14 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído.....	66
Figura 4.15 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de teor em ar, comparando as argamassas com substituição de 5% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência. ....	67
Figura 4.16 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, sem superplastificante (SP). .....	68
Figura 4.17 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC) – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, com superplastificante (SP). .....	69
Figura 4.18 – Representação gráfica dos resultados de teor em ar (reproduzidos da Tabela 4.11 e Tabela 4.13, comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP). .....	70
Figura 4.19 – Representação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas com 5%, 10%, 15%, e 20% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias de hidratação. ....	74
Figura 4.20 – Valores obtidos da resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído (rFCCm). ....	75

Figura 4.21 – Reprodução dos resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído (rFCCm) e 5% de substituição de cimento por resíduo tal como foi recebido da refinaria (rFCC). .....	76
Figura 4.22 – Representação gráfica dos valores da resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de 20%, 25% e 30% de cimento por rFCC (moído e tal como foi recebido da refinaria) e rPN, com e sem adição de SP. ....	77
Figura 4.23 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão (reproduzidos da Tabela 4.22), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP). .....	80
Figura 4.24 – Representação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas com 5%, 10%, 15%, e 20% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias de hidratação. ....	82
Figura 4.25 – Representação gráfica dos valores obtidos da resistência à compressão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído (rFCCm). .....	84
Figura 4.26 – Reprodução dos resultados experimentais da resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por rFCC moído e tal como foi recebido da refinaria .....	85
Figura 4.27 – Representação gráfica dos resultados da Tabela 4.26, referentes à resistência à compressão das argamassas de referência e das argamassas com substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e resíduo de rPN. ....	87
Figura 4.28 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão (reproduzidos da Tabela 4.29), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP). ....	89





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais constituintes do clínquer [17].	15
Tabela 3.1 – Designação e composição das diversas argamassas produzidas	25
Tabela 3.2 – Protocolo utilizado com cada amassadura	26
Tabela 3.3 – Composição da areia siliciosa utilizada na preparação das argamassas.	27
Tabela 3.4 – Composição química e propriedades físicas do Cimento Portland e do resíduo de FCC utilizados[37].	28
Tabela 3.5 – Valores obtidos no Teste de Frattini para amostras de resíduo de FCC com um tempo de moagem de 12 segundos e de 6 segundos.	29
Tabela 3.6 – Composição química do cimento e do resíduo de pedra natural [46].	30
Tabela 3.7 – Protocolo utilizado na preparação das argamassas sem e com superplastificante.	33
Tabela 3.8 – Protocolo utilizado no ensaio da mesa de espalhamento.	36
Tabela 3.9 – Protocolo utilizado na determinação da massa volúmica	37
Tabela 3.10 – Protocolo utilizado na determinação do teor em ar.	38
Tabela 4.1 – Resultados de consistência obtidos pelo ensaio da mesa de espalhamento (em milímetros) das argamassas de referência e com substituição parcial, entre 5 e 30%, de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (rFCC).	49
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de consistência (em milímetros) obtidos no ensaio de mesa de espalhamento para as argamassas de referência e para argamassas com substituição parcial de 5 e 30% de cimento por resíduo de FCC moídos.	51
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de consistência (em milímetros) obtidos no ensaio de mesa de espalhamento (reproduzidos das Tabelas 4.1 e 4.2), comparando as argamassas com substituição parcial 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.	52
Tabela 4.4 – Resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento para as argamassas de referência e para as argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, sem introdução de superplastificante (SP).	53
Tabela 4.5 – Resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, com introdução de superplastificante (SP)	55
Tabela 4.6 – Resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição entre 5% e 30% de cimento por rFCC (tal como recebido da refinaria).	57
Tabela 4.7 – Resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído.	58

Tabela 4.8 – Resultados da massa volúmica (reproduzidos da Tabela 4.6 e da Tabela 4.7), comparando as argamassas com substituição parcial 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.	60
Tabela 4.9 – Resultados de massa volúmica obtidos das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, sem adição de superplastificante (SP).	61
Tabela 4.10 – Resultados de massa volúmica obtidos das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, com introdução de superplastificante (SP).	62
Tabela 4.11 – Resultados obtidos nos ensaios de teor em mar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como recebido da refinaria).	64
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de teor em ar obtidos no ensaio de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição de 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído, com superplastificante (SP).	65
Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios de teor em ar (reproduzidos das Tabela 4.11 e Tabela 4.12), comparando as argamassas com substituição de 5% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.	67
Tabela 4.14 – Resultados do ensaio de teor em ar obtidos das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (rFCC) – tal como recebido da refinaria e moído – e resíduo de pedra natural (rPN), sem introdução de superplastificante (SP).	68
Tabela 4.15 – Resultados do ensaio de teor em ar obtidos das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (rFCC) – tal como recebido da refinaria e moído – e resíduo de pedra natural (rPN), com adição de superplastificante (SP).	69
Tabela 4.16 – Resultados de resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de 5, 10, 15 e 20% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria de Sines).	73
Tabela 4.17 – Valores obtidos para o Índice de Actividade – IA – relativos à resistência à flexão das argamassas com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria de Sines).	73
Tabela 4.18 – Valores obtidos para a resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído.	75
Tabela 4.19 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão (MPa) para as argamassas com substituição de cimento por resíduo de FCC e de PN.	77
Tabela 4.20 – Índice de actividade da resistência à flexão das argamassas com substituição parcial de cimento simultaneamente por resíduo de catalisador exausto de FCC e por resíduo de pedra natural, sem adição de superplastificante.	78

Tabela 4.21 – Índice de actividade da resistência à flexão das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e de pedra natural, com adição de superplastificante.....	78
Tabela 4.22 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão (MPa) (reproduzidos da Tabela 4.16 e da Tabela 4.19), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP). .....	80
Tabela 4.23 – Resultados de resistência à compressão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de 5, 10, 15 e 20% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria de Sines). .....	81
Tabela 4.24 – Valores obtidos para o Índice de Actividade – IA – relativos à resistência à compressão das argamassas de com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria de Sines). .....	82
Tabela 4.25 – Valores obtidos para a resistência à compressão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído. ..	84
Tabela 4.26 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão (MPa) para as argamassas com substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e resíduo de PN. ....	86
Tabela 4.27 – Índice de actividade da resistência à compressão das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e de pedra natural, sem adição de superplastificante. ....	87
Tabela 4.28 – Índice de actividade da resistência à compressão das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e de pedra natural, com adição de superplastificante. ....	87
Tabela 4.29 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão (reproduzidos da Tabela 4.23 e da Tabela 4.26), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com 25% de substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP). .....	89



## LISTA DE ABREVIATURAS

C	Cimento
c.v.	Coeficiente de variação
Cy_rFCCx	Designação atribuída a argamassas em que y representa o teor de cimento e x representa o teor de incorporação de resíduo de FCC
Cy_(rFCC, rPN)x	Designação atribuída a argamassas em que y representa o teor de cimento e x representa o teor de incorporação de resíduo de FCC
EN	Norma Europeia
FCC	Fluid Catalytic Cracking
GEE	Gases com efeito de estufa
IA	Índice de Actividade
NP	Norma Portuguesa
Ref.	Argamassa de referência
Ref_SP	Argamassa de referência com superplastificante
rFCC	Resíduo de catalisador exausto de FCC
rFCCm	Resíduo de catalisador exausto de FCC moído
rPN	Resíduo de pedra natural
SNL	Société Nouvelle du Littoral
SP	Superplastificante
$\sigma$	Desvio padrão







# 1 INTRODUÇÃO

---

O presente documento constitui a dissertação elaborada no âmbito do Trabalho Final de Mestrado (TFM) realizado sob orientação da Professora Carla Costa, com vista à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - na área de especialização de Edificações – pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

As actividades desenvolvidas neste TFM foram enquadradas pelo projecto de investigação científica, em curso, intitulado “ECO-Zement: Reutilização do resíduo de “*cracking*” catalítico em leite fluidizado da refinação de petróleo em materiais de base cimentícia” e que foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e da Petrogal sob a referência PTDC/ECM/113115/2009). Por este motivo, a signatária da dissertação foi membro da equipa de investigação do projecto entre Março e Outubro de 2011. Parte dos resultados experimentais obtidos neste TFM foram incluídos num trabalho intitulado “Waste Oil-Cracking Catalyst Blended Cement” apresentado na conferência internacional International Materials Symposium MATERIAIS 2011 que se realizou em Guimarães, Portugal, entre 18 e 20 de Abril de 2011.

## 1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA

---

A indústria cimenteira tem estado no centro do debate das alterações climáticas porque a produção do cimento é um processo com elevado impacto ambiental, especialmente porque requer a utilização de quantidades significativas de recursos naturais, é energeticamente intensivo e contribui para a emissão de elevadas taxas de CO<sub>2</sub> [1] [2] [3]. Nomeadamente, a indústria do cimento ao contribuir com cerca de 5% das emissões globais de CO<sub>2</sub> antropogénico torna-se um sector de importante contribuição para desenvolver estratégias de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

A comunidade científica identificou há algum tempo a importância de avaliar a possibilidade da substituição parcial do cimento por outros produtos cimentícios contribuindo em concomitância para a: (i) diminuição do impacto ambiental associado à produção de cimento; (ii) mitigação da produção de resíduos sólidos e (iii) melhoria tecnológica dos produtos de base cimentícia finais [4] [5].

Assim, com o intuito de contribuir para o desenvolvimento de soluções que reduzam o impacto ambiental provocado pela indústria cimenteira, no presente TFM pretendeu-se avaliar a viabilidade da substituição parcial de cimento por um resíduo da indústria da refinação de petróleo concretamente, o catalisador exausto produzido na unidade de “*cracking*” catalítico (FCC) da refinaria da Petrogal, em Sines.

## 1.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO

---

Neste sentido, o desenvolvimento deste trabalho final de mestrado incide na substituição parcial do cimento por outros produtos cimentícios e pretende avaliar o comportamento dos materiais cimentícios com incorporação de resíduo petroquímico em relação às especificações requeridas pelas normas em vigor.

Os objectivos deste trabalho são:

- 1) Determinar o efeito do teor de resíduo de FCC incorporado em argamassas de cimento e areia em propriedades reológicas e mecânicas;
- 2) Avaliar se as misturas de cimento com incorporação de resíduos correspondem às especificações requeridas pelas normas europeias em vigor;
- 3) Contribuir para a mitigação das emissões de dióxido de carbono provocadas pelo processo de produção de cimento;
- 4) Contribuir para a redução do consumo de recursos naturais não renováveis utilizados no fabrico do cimento.

## 1.3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

---

Com vista à prossecução dos objectivos do TFM apresentados anteriormente (secção 1.2) definiu-se a abordagem metodológica que se apresenta de seguida.

Numa primeira fase prepararam-se argamassas de cimento de acordo com a norma NP EN 197-1:2001 [6], e argamassas nas quais o cimento foi parcialmente substituído com catalisador exausto de FCC (misturas binárias). As percentagens de incorporação de resíduo foram 5%, 10%, 15%, 15%, 20%, 25% e 30%, em massa. Foram também preparadas argamassas com este resíduo mas moído em percentagens de 5% e 30% de substituição de cimento (misturas ternárias). Nestas argamassas, realizaram-se ensaios

- (i) No estado fresco: ensaio de consistência por espalhamento, determinação da massa volúmica e ensaio de teor em ar;
- (ii) No estado endurecido: ensaio de resistência à flexão e ensaio de resistência à compressão.

Numa segunda fase, preparam-se argamassas nas quais o cimento foi parcialmente substituído por catalisador exausto de FCC e por um resíduo de pedra natural (misturas ternárias). As percentagens totais de substituição de cimento por ambos os resíduos foram 20%, 25% e 30%, em massa, sendo que destes 40% eram resíduo de catalisador exausto de FCC e 60% eram resíduo de pedra natural. Estas argamassas foram também ensaiadas no estado fresco e

endurecido, realizando-se os mesmos ensaios que foram realizados com as argamassas preparadas só com resíduo de catalisador exausto de FCC.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

---

A dissertação que se apresenta está organizada em 5 capítulos, Referências Bibliográficas e Anexos, sendo o primeiro capítulo o presente capítulo introdutório.

No Capítulo 2 é feita uma abordagem, baseada em referências bibliográficas, ao estado actual do conhecimento no âmbito dos cimentos utilizados actualmente, em particular dos cimentos com incorporação de materiais cimentícios.

O capítulo 3 descreve a campanha experimental desenvolvida neste estudo, fundamentada com a respectiva normalização em vigor. Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, as formulações das argamassas estudadas e descritos os procedimentos experimentais para a sua preparação, assim como moldagem, desmoldagem e condições de cura dos provetes obtidos destas argamassas. São sistematizados os protocolos utilizados para cada ensaio e são apresentados os equipamentos utilizados nesta campanha experimental.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas elaboradas, acompanhados de uma análise crítica com base também em documentos de outros autores, particularmente nos referidos no Capítulo 2. Optou-se por dividir este capítulo em dois subcapítulos distintos: ensaios no estado fresco e ensaios no estado endurecido. A análise dos dados é fundamentada através de tabelas e gráficos, estabelecendo correlações entre os resultados dos diferentes tipos de argamassas em idades distintas, comparando-se sempre o desempenho das mesmas com as argamassas de referência.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho e, adicionalmente, sugerem-se algumas perspectivas numa óptica de continuidade para trabalhos que se venham a desenvolver no futuro.

Depois de todos os capítulos encontra-se a secção Referências Bibliográficas onde é descrita toda a bibliografia consultada para a elaboração deste trabalho.

No final deste trabalho encontra-se a secção Anexos, com toda a documentação utilizada neste trabalho e que pode ser útil para a sua interpretação, assim como tabelas com todos os resultados obtidos nesta campanha experimental.



## 2 ESTADO DA ARTE

---

O presente Trabalho Final de Mestrado pretende contribuir para o desenvolvimento de novos materiais à base cimento com incorporação de resíduos da indústria petroquímica e que, ainda assim, assegurem as mesmas funcionalidades em termos de propriedades mecânicas e que, em concomitância, satisfaçam os requisitos e critérios de conformidade estabelecidos pelas normas europeias em vigor. Estes materiais deverão contribuir para a mitigação do impacto ambiental da indústria do cimento ao mesmo tempo que se aproveita um resíduo cujo destino mais comum é os aterros sanitários, uma solução ambientalmente também muito desfavorável.

Com o intuito de enquadrar a relevância do trabalho e a solução proposta, é feita, no presente capítulo, uma breve descrição do método de produção actual do cimento pondo em evidência as etapas que mais contribuem para o impacto ambiental desta indústria (subcapítulo 2.1), da composição do cimento das propriedades a que o cimento deve corresponder e dos documentos que normalizam a sua utilização (subcapítulo 2.2). Adicionalmente, descreve-se, sucintamente, o impacto ambiental que o processo de fabrico causa na Terra e apresentam-se possíveis soluções para a redução deste impacto procurando pôr em evidência o potencial que o resíduo da indústria petroquímica que se vai estudar apresenta na produção de cimentos com menor impacto ambiental.

### 2.1 INDÚSTRIA DO CIMENTO

---

#### 2.1.1 PROCESSO DE FABRICO CIMENTO

O processo de fabrico de cimento envolve uma série de transformações físicas e químicas das matérias-primas principalmente calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio e ferro), recorrendo também à acção de calor, que tem associado um impacto ambiental relevante como se evidenciará de seguida.

A produção de cimento é um processo que consome energia na obtenção da matéria-prima, e principalmente na clínquerização e na produção de cimento propriamente dita, como se explicará a seguir.

Na Figura 2.1 está representado um esquema do processo de fabrico do cimento, desde a pedra até à expedição deste material.

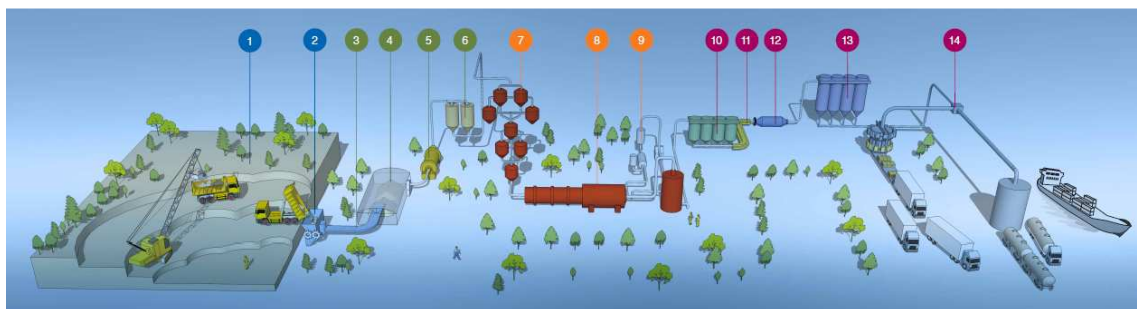


Figura 2.1 – Esquema do processo de fabrico do cimento [7].

Este processo inicia-se com a extração das matérias-primas em pedreiras nomeadamente calcário e argila, recorrendo a perfuração e desmonte com explosivos ou por mineração mecânica de superfície (corresponde ao passo 1 da Figura 2.1). Verifica-se, nesta fase, um grande consumo de recursos naturais não renováveis correspondente a cerca de 1,7 tonelada por cada tonelada de produto final – cimento – produzido [8].

O material, depois de britado (corresponde ao passo 2 da Figura 2.1) é transportado até à fábrica de cimento, através de uma tela transportadora, de camião, por caminho-de-ferro, ou via fluvial, consoante a distância da pedreira em relação à fábrica de cimento (corresponde ao passo 3 da Figura 2.1). O calcário e a argila, bem como as matérias-primas alternativas e os materiais correctivos da composição química das mesmas, são misturados e pré-homogeneizados por depósito em várias camadas que dão origem à formação de uma pilha de material (corresponde ao passos 4 da Figura 2.1).

As matérias-primas homogeneizadas e devidamente doseadas, tendo em consideração o produto final que se pretende obter, passam a designar-se por “cru”, e alimentam um moinho de bolas ou a um moinho vertical onde são submetidos a uma operação de secagem e de diminuição do tamanho das partículas que o constituem passando a designar-se correntemente por “farinha”. À entrada da moagem de cru pode haver ainda lugar a uma pequena e derradeira correcção na composição química do cru (corresponde ao passo 5 da Figura 2.1). A farinha, proveniente da moagem de cru, é sujeita a uma última operação de homogeneização e fica armazenada (corresponde ao passo 6 da Figura 2.1) até à condução aos ciclones e posteriormente ao forno onde ocorre a “cozedura”.

A farinha é submetida a um pré-aquecimento nos ciclones (corresponde ao passo 7 da Figura 2.1) e onde se verifica a maior parte (> 90%) da decomposição do calcário - decarbonatação - ocorrendo uma grande emissão de gases de efeito de estufa particularmente, ( $\text{CO}_2$ ), entrando depois no forno. As fábricas dispõem de filtros de mangas ou electrofiltros de grandes dimensões que procedem à remoção das poeiras provenientes do circuito de gases do forno e do circuito de gases de exaustão do moinho de cru.

As matérias-primas moídas “farinha” alimentam um forno cilíndrico horizontal (passo 8 da Figura 2.2 onde a temperatura atinge os 1450°C (sob a acção de uma chama que atinge 2000°C) – sofrendo uma série de reacções químicas a partir das quais se obtém um produto que se denomina “clínquer”.

O clínquer incandescente é arrefecido bruscamente no arrefecedor de grelha ou de satélites, até uma temperatura entre os 100 e os 200°C e é enviado para a respectiva zona de armazenagem (passo 9 da Figura 2.1).

Este processo de clinquerização é fonte de grandes emissões de CO<sub>2</sub> devido a dois factores:

- Uma grande quantidade de combustível é consumida para produção de energia térmica; e,
- Libertação deste gás no processo de clinquerização.

O cimento é o produto que se obtém da moagem fina de clínquer com gesso (3 a 8%, em massa). Nesta fase (passo 12 da Figura 2.1) podem ainda ser incorporadas adições como cinzas volantes, pozolanas naturais, escórias de alto-forno e calcário. Se estas adições estiverem presentes em mais de 5% em massa são consideradas constituintes principais do cimento à luz da norma NP EN 197-1:2001 (ver Secção 2.2.1).

O cimento extraído dos silos é ensacado, ou ensacado e paletizado, ou ensacado e colocado em pacotões de plástico retráctil ou, ainda, carregado directamente a granel em camiões-cisterna, vagões-cisterna, ou navios (passo 14 da Figura 2.1) [7].

### 2.1.2 IMPACTO AMBIENTAL

Como é sabido, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um gás que existe naturalmente na Terra. No entanto, a produção de CO<sub>2</sub> em excesso tem graves implicações no equilíbrio climático do planeta. O Homem tem contribuído fortemente para este acréscimo de produção de CO<sub>2</sub> e a indústria cimenteira influencia em grande parte este problema, estando associada a esta indústria um grande impacto ambiental.

Na Figura 2.2 pode-se observar a distribuição das emissões de dióxido de carbono no ano de 2010 por sector de actividade.

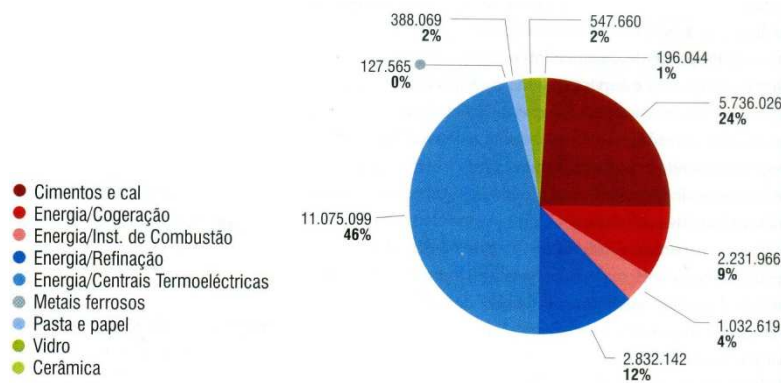


Figura 2.2 – Distribuição das emissões verificadas no ano de 2010 por sector de actividade [9].

O cimento é um dos materiais de construção mais importantes do mundo, sendo usado principalmente para a produção de betão, que é o segundo material mais consumido no mundo, sendo o seu consumo apenas superado pelo da água.

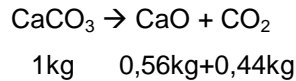
De seguida sistematizam-se os principais impactos ambientais associados ao processo de fabrico de descrito na secção 2.1.1.

- Consumo de grandes quantidades de recursos naturais não renováveis, nomeadamente calcário e argila. Concretamente, por cada tonelada de cimento produzida são consumidas cerca de 2 toneladas de matérias-primas[8];
- Consumo significativo de electricidade e combustíveis fósseis não renováveis (sobretudo, carvão, coque de petróleo e gás natural): uma tonelada de cimento, consome o equivalente a 60 a 130kg de combustível (*fuel oil*) e 110kWh de energia eléctrica [2];
- Emissões de gases com efeito de estufa (GEE), nomeadamente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), provocadas pela queima do combustível, e pela descarbonatação de calcário. A produção de uma tonelada de cimento corresponde à emissão de cerca de uma tonelada de CO<sub>2</sub>. [2].

As emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de clínquer de cimento Portland subdividem-se basicamente em duas parcelas:

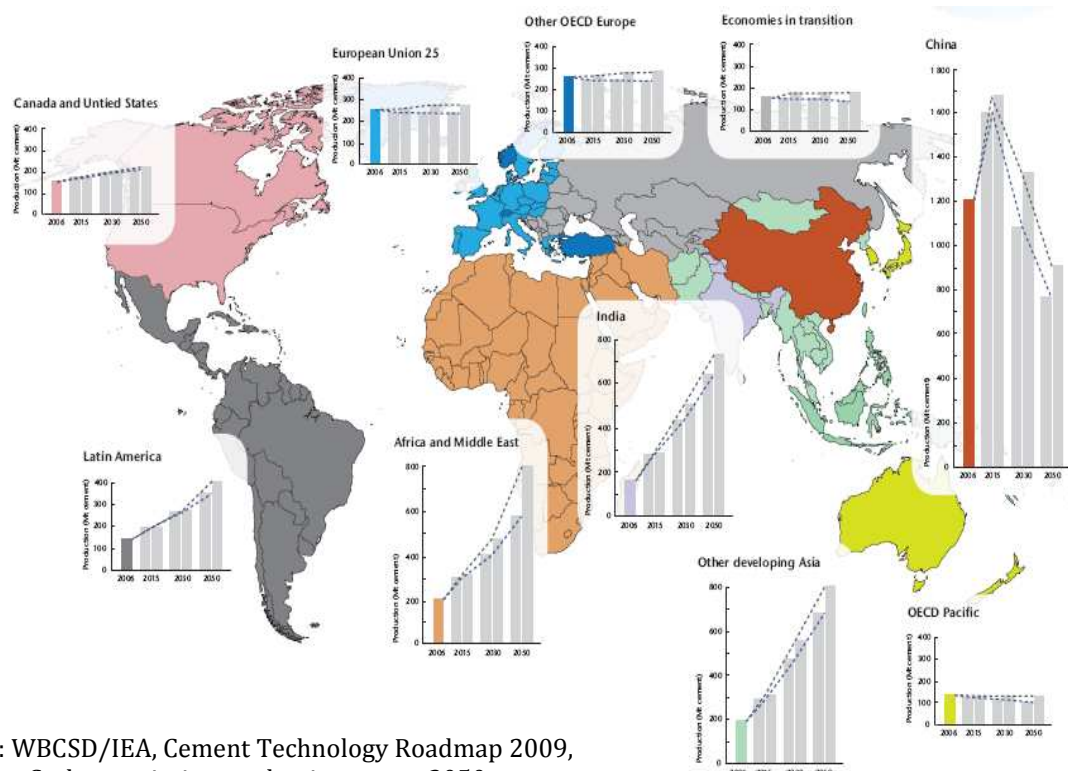
- Cerca de 40% das emissões de CO<sub>2</sub> advêm dos combustíveis utilizados em todo o processo industrial[10];
- Cerca de 60% das emissões de CO<sub>2</sub> advêm do processo de calcinação do calcário[10].

O processo de calcinação do calcário emite dióxido de carbono devido à transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio (a temperaturas da ordem dos 1000°C), traduzindo-se este processo pela seguinte equação:



Em suma, as emissões de CO<sub>2</sub> na produção de cimento advêm directamente da combustão de combustíveis fósseis e da calcinação do calcário, sendo que, para a produção de 1 tonelada de cimento (i) consomem-se cerca de 2 toneladas de recursos naturais não renováveis, (ii) consome-se o equivalente a 60-130kg de combustível e 110kWh de energia eléctrica, o que corresponde a 0,2-3,5GJ (o que equivale a 2% do consumo energético primário global, ou quase 5% do consumo total de energia consumida pelas indústrias [3] e, (iii) emite-se 1 tonelada de CO<sub>2</sub>, sendo responsável por 5% das emissões de CO<sub>2</sub> antropogénicas globais da Terra [3].

Devido à importância do cimento como material de construção, e devido à abundância geográfica das principais matérias-primas de que é constituído, o impacto ambiental é ampliado pelo facto do fabrico do cimento ser uma produção a nível local e, como tal, generalizam-se as instalações das fábricas de cimento pelo mundo, operando em cerca de 150 países [2].



Fonte: WBCSD/IEA, Cement Technology Roadmap 2009,  
Carbon emissions reductions up to 2050,  
[www.iea.org/roadmaps](http://www.iea.org/roadmaps), 1 Abril 2011

Figura 2.3 – Produção de cimento estimada até ao ano 2050 [10].

Na Figura 2.3 pode observar-se distribuição regional da produção de cimento do ano 2006, e estimada para os anos 2015, 2030 e 2050. Prevê-se que até 2050 a produção de cimento cresça

entre 0,8-1,2% por ano, alcançando uma produção de cerca de 3700 megatonelada e 4400 megatonelada em 2050, o que representa um aumento entre 43-72% comparado com a produção em 2006 [8]

Além disso, como as projecções existentes apontam para que o consumo mundial de cimento Portland possa duplicar nos próximos 40 anos, tal facto agravará de modo substancial os efeitos negativos das referidas emissões [11].

Países emergentes como por exemplo a China e a Índia produzem grande parte da produção mundial de cimento, como se pode observar na Figura 2.3, continuando a provocar um grande impacto ambiental no futuro, pelo que a avaliação das opções para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> merecem especial atenção. Na secção seguinte, descrever-se-ão as medidas de mitigação do impacto ambiental adoptadas.

### **2.1.3 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL**

A elevada consciência actual de que as indústrias devem orientar as suas actividades de forma sustentável e a necessidade de corresponder aos compromissos assumidos com a assinatura do Protocolo de Quioto[12] conduziram ao estabelecimento das seguintes quatro alavancas para o sector da indústria do cimento, com o objectivo de conduzir à mitigação do seu impacto ambiental nomeadamente para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> [8]:

1. Eficiência energética (térmica e eléctrica)
2. Combustíveis alternativos aos actuais
3. Substituição do clínquer, que é um produto intermédio na produção do cimento;
4. Captura e armazenamento do CO<sub>2</sub>

Na Figura 2.4 estão representados os objectivos definidos para a indústria do cimento em termos de redução das emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo até 2050 e o contributo de cada uma das quatro alavancas referidas[2].

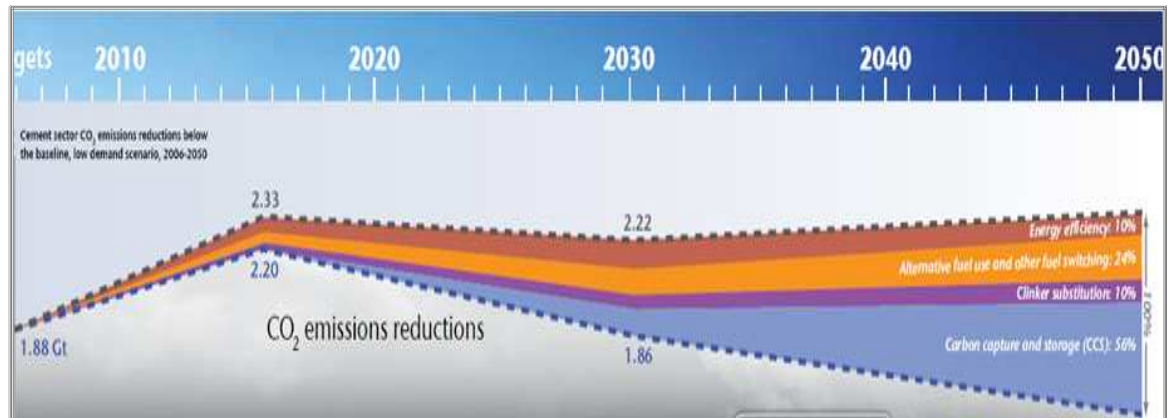


Figura 2.4 – Objectivos definidos para a indústria do cimento em termos de redução das emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo até 2050 e o contributo de cada uma das alavancas estabelecidas para a mitigação deste gás[13].

No presente trabalho final de mestrado ao pretender avaliar-se o potencial de substituição parcial do clínquer por outro material – concretamente, um resíduo da indústria petroquímica – está a dar-se um contributo no âmbito da alavanca “Substituição do clínquer”.

Sendo a produção do clínquer a etapa que consome mais energia na produção do cimento, emite, conseqüentemente, uma grande quantidade de CO<sub>2</sub>. Nos cimentos com substituições de clínquer, este é substituído parcialmente por materiais com características pozolânicas (Subcapítulo 2.3), ou não pozolânicas, que podem ser naturais ou subprodutos industriais, levando à obtenção de diferentes tipos de cimentos, como será descrito na secção 2.2.1.

Quando o substituto do clínquer é um resíduo de outra indústria verificam-se ainda as seguintes vantagens adicionais em termos ambientais:

- Mitigação do volume de resíduo para aterro;
- Redução dos custos com a gestão do resíduo para aterro;
- Aumento dos lucros associados à transformação de um resíduo num produto de valor acrescentado.

Os avanços tecnológicos e económicos tornaram a eliminação, a reciclagem e o reaproveitamento de subprodutos industriais um grande desafio. A indústria do cimento pode dar um contributo importante também para o sucesso deste desafio porque tem a capacidade de absorver grandes quantidades de resíduos sólidos.

Na secção 2.3 apresenta-se um eventual substituto parcial do clínquer estudado no âmbito deste trabalho, bem como as características que lhe conferem qualidades de potencial substituto do clínquer.

## 2.2 CIMENTOS CORRENTES

### 2.2.1 DEFINIÇÃO, COMPOSIÇÃO E NORMALIZAÇÃO

As primeiras utilizações conhecidas de materiais com propriedades de endurecimento sob a acção da água remontam há cerca de 4500 anos, com a descoberta de obras nas quais se usaram solos de origem vulcânica que possuíam propriedades de endurecimento sob a acção da água [14].

Nos tempos mais recentes, o grande passo que conduziu ao desenvolvimento do cimento que se usa actualmente foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência com calcário e pozolanas[14]. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente calcário finamente moído com argila obtendo um material com resistência superior ao que até então se tinha obtido. Este produto com propriedades hidráulicas não se dissolvia, contudo, em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, numa alusão às rochas extraídas da ilha britânica de Portland por apresentarem cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes[15].

O cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa e endurece por reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água [6].

Todos os cimentos e os seus constituintes (principais e adicionais) estão definidos e apresentados na norma europeia NP EN 197:2001 [6]. Os cimentos que cumpram esta norma europeia são designados por “cimentos correntes”, abreviadamente CEM (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Constituintes de um cimento CEM.

A norma europeia EN 197-1:2001 define e apresenta as especificações de 27 cimentos correntes distintos e os seus constituintes como se pode ver no Anexo A.

A definição de cada cimento inclui as percentagens em que os constituintes são combinados para produzir estes diferentes produtos. Os 27 produtos da família dos cimentos correntes, abrangidos nesta norma estão agrupados em cinco tipos principais de cimento que se sistematizam na Figura 2.6.

CEM I	Cimento portland
CEM II	Cimento portland composto
CEM III	Cimento de alto forno
CEM IV	Cimento pozolânico
CEM V	Cimento composto

Figura 2.6 – Cinco tipos principais de cimento CEM.

Como foi referido na secção 2.1.2, como da produção de clínquer resulta uma grande quantidade de emissão de CO<sub>2</sub>, este pode ser substituído parcialmente por outros materiais de modo a reduzir as emissões de dióxido de carbono.

À excepção do CEM I, que é composto apenas por clínquer e constituintes adicionais minoritários, os produtos da família dos cimentos correntes consistem em ligantes hidráulicos com características cimentícias formados por diversos materiais minerais que se podem incorporar com o clínquer para a elaboração de um ligante hidráulico comercializável e em conformidade com as normas europeias em vigor.

Estes tipos de cimento diferenciam-se de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem. Podem diferir também em função de propriedades intrínsecas, como alta resistência inicial, a cor branca, etc.

Os diversos tipos de cimento portland composto – CEM II – (A-S, B-S, A-D, A-P, B-P, A-Q, B-Q, A-V, B-V, A-W, B-W, A-T, B-T, A-L, B-L, A-LL, B-LL, A-M, B-M) têm adições dos seguintes materiais cimentícios em proporções referidas no Anexo A:

- escória de alto forno,
- sílica de fumo
- pozolana
- cinzas volantes

- xisto calcinado
- calcário.

Já o cimento portland de alto forno (CEM III) e o cimento portland pozolânico (CEM IV) contam com clínquer e vários constituintes, como se pode verificar no Anexo A.

Quando estes elementos são adicionados ao clínquer numa percentagem superior a 5% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários designam-se constituintes principais e dão origem aos diversos tipos de cimento, como foi referido anteriormente, que podem ser CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV e CEM V, consoante o elemento adicionado ao clínquer.

Estes materiais podem vir já de fábrica incorporados com cimento Portland constituindo os 27 produtos da família de cimentos correntes, de acordo com a NP EN 197-1:2001 (nesta situação em rigor não se utiliza o termo “adição” para designar estes materiais, mas sim constituinte principal, tal como o clínquer).

Na Figura 2.7 está representado um gráfico com o consumo dos diversos tipos de cimentos na Europa desde 1990 até 2007. Verifica-se principalmente o aumento do CEM II em detrimento do CEM I.

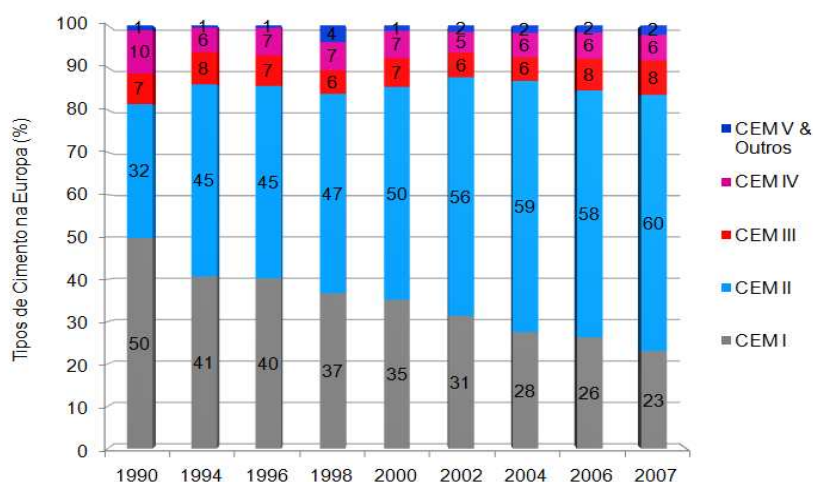


Figura 2.7 – Consumo dos vários tipos de cimentos na Europa ao longo do tempo [16].

As composições, especificações e critérios de conformidade dos cimentos correntes estão descritos em diversas normas desenvolvidas por alguns países da Europa, entre as quais se destacam algumas:

- **NP EN 197-1 (2001) Cimentos – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade.**

- **NP EN 197-2 (2001) Cimentos – Parte 2: Critérios de conformidade.**
- **NP EN 197-4 (2005) Cimento - Parte 4: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos de alto-forno de baixas resistências iniciais**

Actualmente, no sentido de contribuir para encontrar mais adições comercializáveis, estão a ser desenvolvidos estudos que incluem a substituição de cimento por outros materiais. Neste âmbito, estão a ser utilizadas várias alternativas para aproveitamento de materiais considerados resíduos como substituição parcial de cimento, que de outro modo seriam acumulados em armazéns ou depositados em aterros.

No trabalho exposto pretende-se avaliar um material que pudesse ser considerado um constituinte principal dos cimentos correntes a enquadrar no grupo CEM II ou CEM V, consoante a composição (percentagem em massa) que apresentar em substituição do clínquer, como será descrito mais adiante na secção “Resíduo da refinação de petróleo” (Secção 2.3).

#### 2.2.1.1 Principais constituintes do clínquer

O cimento é constituído basicamente por sulfato de cálcio (gesso) e clínquer. As reacções químicas que ocorrem pela acção da temperatura – na fase de clinquerização –, a partir da matéria-prima constituída principalmente por calcário e argila levam à formação dos seguintes óxidos que integram os constituintes principais do clínquer:

- Silicatos bicálcicos;
- Silicatos tricálcicos;
- Aluminatos tricálcicos;
- Aluminoferratos tetracálcicos;

Estes óxidos encontram-se seguidamente descritos na Tabela 2.1, com indicação da percentagem em que normalmente ocorrem nos cimentos Portland.

Tabela 2.1 – Principais constituintes do clínquer [17].

Óxido	Composição química	Quantidade (%)	Notação na Química do Cimento	Nome
Silicato bicálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub>	10 a 55%	C <sub>2</sub> S	Belite
Silicatos tricálcicos	3CaO.SiO <sub>2</sub>	20 a 65%	C <sub>3</sub> S	Alite
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 a 15%	C <sub>3</sub> A	-
Aluminoferrato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 a 15%	C <sub>4</sub> AF	Celite

Os componentes principais do clínquer apresentam as seguintes características:

- $C_3S$  – principal responsável pelas propriedades hidráulicas e mecânicas do cimento, reage rapidamente com a água provocando uma libertação imediata de calor.
- $C_2S$  – reage lentamente com a água e liberta menor calor de hidratação que o  $C_3S$ , contribuindo a longo prazo para a resistência final do cimento.
- $C_3A$  – principal responsável pela presa do cimento, reage rapidamente com a água, conferindo ao cimento, juntamente com o  $C_3S$ , a resistência inicial.
- $C_4AF$  – a sua característica principal é a resistência à corrosão química do cimento, e é o responsável pela cor cinzenta do cimento, devido à presença do ferro.

O clínquer, depois de arrefecido, pode ser então moído com uma pequena percentagem de diversos elementos normalizados na norma NP EN 197-1:2001, referidos na secção 2.2.1.

Como foi referido, o cimento pode ter como constituintes principais não só clínquer e gesso como também outros materiais inorgânicos, previstos na norma europeia NP EN 197-1:2001. A incorporação de resíduos na produção de materiais cimentícios pode reduzir a emissão de  $CO_2$  e o consumo de energia, e por isso contribuir para a redução do impacto ambiental.

A incorporação destes materiais pode traduzir-se em vantagens tecnológicas - quando se reflecte na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade dos produtos finais à base de cimento - bem como, concorrer para a mitigação do impacto ambiental associado à produção de cimento.

As vantagens tecnológicas e ambientais decorrentes da incorporação de outros materiais além do clínquer e gesso no cimento têm promovido a realização de estudos com vista a avaliação de materiais existentes, considerados resíduos actualmente. De entre estes materiais potenciais substitutos do clínquer podem referir-se cinzas de casca de arroz[18], cinzas de bagaço da cana-de-açúcar[19], cinzas volantes e metacaulino[20], cinzas volantes[21], catalisador exausto de resíduo de FCC[22], clinoptilolite [23], entre outros.

Neste trabalho pretende-se avaliar a possibilidade de utilização de um resíduo da refinaria: catalisador exausto de FCC produzido pela indústria petroquímica, na unidade de *cracking* catalítico em leito fluidizado da refinaria da Petrogal, em Sines, como material cimentício substituto parcial do clínquer, na produção de cimento, descrito adiante na secção 2.3.

## 2.2.2 HIDRATAÇÃO

Para se compreender o processo pelo qual o cimento adquire algumas das suas principais características terá que ser explicado sucintamente o processo da hidratação, onde se dão as reacções dos principais constituintes do clínquer que irão conferir ao cimento a sua resistência e durabilidade.

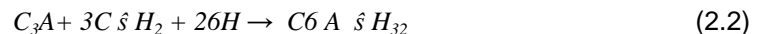
O clínquer depois de moído com uma percentagem dos constituintes referidos anteriormente e gesso, designa-se cimento e em contacto com a água dá origem a um novo sistema de compostos hidratados estáveis que conferem ao conjunto uma resistência elevada[17].

De seguida descreve-se uma possível explicação simplificada da hidratação do cimento.

O aluminato tricálcico no estado puro ( $C_3A$ ) reage com a água muito rapidamente (ao fim de alguns minutos), conduzindo a uma presa rápida ou instantânea, acompanhada por desenvolvimento de calor, como se pode verificar na seguinte equação, expressa em notação na Química do cimento:



Para moderar ou retardar esta reacção é necessário juntar ao cimento um sulfato (cerca de 3 a 4%), o mais económico dos quais é o gesso natural – designado na equação seguinte por  $\hat{s}$ . Este reage lentamente com o  $C_3A$  formando-se etringite ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) - sulfoaluminato de cálcio hidratado - isto é, o gesso protege o  $C_3A$  de uma reacção demasiado rápida com a água, de acordo com a seguinte reacção:



Depois de cerca de 24 horas o gesso já foi totalmente consumido e começa a transformação da etringite,  $C_6A\hat{s}H_{32}$ , em monosulfoaluminato ( $3C_4A\hat{s}H_{12}$  ou  $C_3A\hat{C}\hat{s}H_{12}$ ), que resulta da combinação da etringite com aluminato tricálcico ainda existente. Repare-se que o facto de se juntar gesso não evita totalmente a reacção de hidratação directa do  $C_3A$ , apenas a atrasa.

A hidratação do aluminoferrato tetracálcico ( $C_4AF$ ) verifica-se durante o mesmo período de hidratação do  $C_3A$  e também envolve um composto intermédio com gesso. Os produtos finais da hidratação de  $C_4AF$  parecem ser aluminatos tricálcicos hidratados e uma fase amorfa ferrítica. É possível também que parte do óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ) esteja presente em solução sólida nos aluminatos tricálcicos hidratados.

De uma forma simplificada poder-se-á dizer que o  $C_4AF$  reage com a água originando aluminatos de cálcio hidratados - C-A-H - (que podem também ter ferro na sua constituição).

O  $C_3S$  e o  $C_2S$  reagem com a água formando-se como silicatos de cálcio hidratados – C-S-H e hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), de acordo com as seguintes reacções:



Os C-S-H são os principais responsáveis pela resistência atingida no cimento endurecido. Note-se desde já, que é importante para o estudo das acções agressivas sobre o betão, que estes silicatos hidratados somente são estáveis quando em contacto com soluções saturadas de hidróxido de cálcio (que a 20°C contenham 1585 mg a 1450 mg deste hidróxido por litro de água o que corresponde a um domínio do pH de 12,34 a 12,20).

Em suma, o endurecimento hidráulico de cimento CEM é fundamentalmente devido à hidratação de silicatos de cálcio embora outros compostos químicos, tais como os aluminatos, possam também participar no processo de endurecimento.

O endurecimento do cimento é lento, pelo que em geral nunca se considera que as reacções se completaram mas que se atingiu um determinado grau de hidratação[17].

### 2.3 RESÍDUO DA REFINAÇÃO DE PETRÓLEO ENQUANTO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO

---

Como foi referido na secção 2.2.1, neste trabalho pretende-se avaliar a substituição parcial do cimento por um resíduo da refinação do petróleo – catalisador exausto de FCC – que será descrito seguidamente nesta secção.

Nas unidades operacionais de *cracking* catalítico em leito fluidizado (denominadas frequentemente, por “unidades de FCC” do inglês “*Fluid Catalytic Cracking*”) ocorre um dos processos mais importantes desta indústria que consiste na conversão catalítica de fracções de hidrocarbonetos destiladas anteriormente e ainda pesadas (e sem grande valor comercial) em moléculas mais leves de gás, gasolina e gasóleo, com maior valor acrescentado. Industrialmente, o processo ocorre a temperaturas elevadas, entre 300 a 700°C[24], a pressões moderadas, entre 2 e 3 bar na presença de um catalisador fluidizado, em pó[24].

Os catalisadores empregues em cada unidade de FCC são sintetizados especificamente para a refinaria em que vão ser usados e em função dos produtos que se pretendem obter, logo o catalisador utilizado neste estudo não terá sido ainda estudado uma vez que é original da refinaria de Sines, da qual não se conhecem estudos deste material. De qualquer forma, embora possam apresentar diferenças nas propriedades físicas e químicas entre si, devem corresponder aos seguintes requisitos[24]: boa estabilidade a temperatura e pressão a elevada; actividade catalítica elevada; boa resistência ao atrito; poros largos; e, formarem pouco coque (compostos poliaromáticos insaturados).

Os catalisadores de FCC são constituídos por partículas com dimensões muito pequenas – Figura 2.8 –, com uma distribuição de tamanho de partícula tipicamente entre 60 a 100 µm[24] e com quatro componentes principais:

- zeólito Y – um aluminossilicato cristalinos, e é o componente activo principal. Constitui entre 15 a 50%, em massa, da massa do catalisador;
- matriz – constituída, essencialmente, por alumina ou silico-alumina amorfa, também apresenta actividade catalítica;
- ligante – é, tipicamente, sílica sol e assegura resistência e integridade ao catalisador;
- *filler* – normalmente é uma argila e também, assegura resistência e integridade ao catalisador.

Na Figura 2.8 apresenta-se uma imagem de microscopia electrónica de varrimento das partículas dos catalisadores exaustos da unidade de FCC da refinaria da Petrogal em Sines.

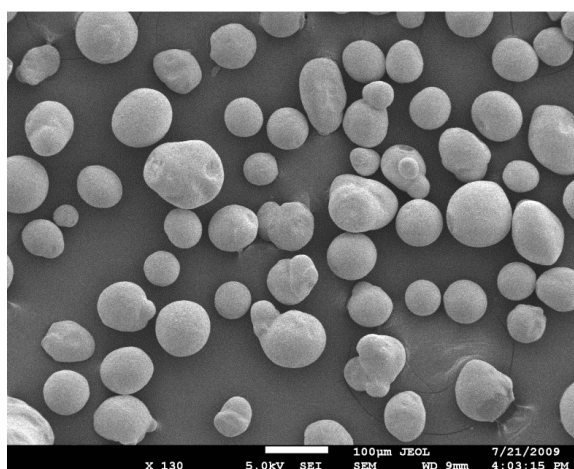


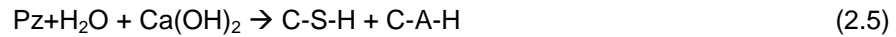
Figura 2.8 – Imagem de microscopia electrónica de varrimento, obtida em modo de electrões secundário (JEOL JSM 7001F, das partículas dos catalisadores exaustos da unidade de FCC da refinaria da Petrogal em Sines[25].

A actividade de *cracking* (cisão) catalítico de hidrocarbonetos produz coque (compostos poliaromáticos insaturados) que se deposita sobre a superfície do catalisador, diminuindo rapidamente a sua reactividade. O catalisador de FCC desactivado i.e., exausto, é regenerado na presença de ar, a temperaturas elevadas, entre os 680 a 750 °C [14], para voltar a entrar no reactor químico. Contudo, para assegurar a necessária actividade catalítica, após cada etapa de regeneração uma parte do catalisador exausto é substituída por quantidades equivalentes de catalisador fresco.

O catalisador exausto removido do processo contém na sua composição teores significativos de alumina e sílica pelo que é, potencialmente, um material pozolânico[25].

Materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente divididos e na presença de humidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente para formar composto com propriedades cimentícias[19].

Uma pozolana por si só não é um ligante e, como tal, necessita de hidróxido de cálcio – um produto das reacções de hidratação do de cimento para reagir com água. Assim, a reacção de hidratação da pozolana pode traduzir-se simplificada por:



Os compostos C-S/A-H têm um arranjo atómico que pode ser mais denso provocando um aumento de resistência e de durabilidade o que faz com que estes materiais adquiram características cimentícias superiores as do cimento que só tem C-S-H.

O catalisador exausto de FCC é potencialmente uma pozolana e, como tal, se misturado com água origina C-S-H e C-A-H.

Como foi mencionado na secção 2.2.2, a reacção de hidratação consiste basicamente na formação do silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado, etringite, monossulfato de cálcio hidratado e do hidróxido de cálcio, a partir da reacção dos compostos do cimento ( $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ ) com a água. Quando adições com minerais de elevada actividade pozolânica, como o catalisador exausto de FCC, são incorporadas à matriz de cimento, eles podem reagir com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, formando uma quantidade de produto hidratado adicional na matriz de cimento hidratada.

Neste sentido, a reutilização de resíduo de catalisador exausto de FCC nos materiais de construção podem ser avaliados sob diversas perspectivas:

- Contribuir para a mitigação do consumo de recursos naturais não renováveis;
- Contribuir para a redução de emissões de  $\text{CO}_2$  na produção de clínquer;
- Contribuir para a redução de combustível utilizado no processo de fabrico do cimento;
- Contribuir para mitigação do aterro de resíduos sólidos em aterros da indústria de petróleo, tornando-o num produto de valor acrescentado.

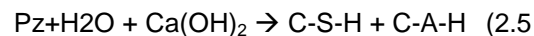
Neste trabalho pretende-se avaliar, principalmente, o efeito nas propriedades mecânicas da substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC, variando a fracção volúmica de resíduo incorporado.

Em trabalhos referidos na literatura na qual a substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC foi realizada verificou-se que o processo de hidratação deste cimento composto é mais exotérmico – particularmente, para percentagens de incorporação baixas de cerca de 5% – do que o que se verifica em pastas com cimentos sem incorporação de resíduo[26][27][28]. Este aumento de temperatura pode reflectir-se na aceleração do processo de presa e no aumento da resistência para tempos de hidratação curtos.

Os catalisadores de FCC possuem elevada área superficial específica com elevada afinidade para a água. Por esta razão a incorporação destes resíduos, como substitutos de cimento, traduzem-se na perda de consistência tanto das argamassas[27][29][28][30] como dos betões[31], no estado fresco. Este facto traduz-se na necessidade frequente de adicionar um plastificante, ou mais água, à mistura.

A incorporação de catalisador exausto de FCC também pode influenciar o tempo de presa verificando-se, tipicamente, uma diminuição neste tempo com o aumento do teor de resíduo incorporado[28], embora haja registos de misturas cimento/catalisador de FCC para as quais o tempo de presa é semelhante[32].

Estudos termogravimétricos[26][27][31][33][34][35] e de difracção de raios-X[26][31] [36] realizados para analisar o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  presente em pastas de cimento confirmaram a actividade pozolânica deste resíduo ao verificar-se que o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  nas amostras com incorporação de resíduo é inferior ao teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  nas pastas que não têm resíduo e que deverá ter sido consumido durante a reacção pozolânica (2.5):



O efeito da substituição parcial de cimento por resíduos catalíticos de FCC em argamassas pode traduzir-se no aumento ou na diminuição da resistência mecânica [27] [37] em relação à das argamassas sem catalisador de FCC, dependendo da composição do catalisador, da percentagem de substituição, do tempo de hidratação, do grau de finura dos grãos do catalisador, bem como da composição dos outros constituintes presentes na argamassa. No entanto, tipicamente, percentagens de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC entre 10 a 20% conduzem, ao fim de dado tempo de hidratação, a valores de resistência mais elevados do que os das argamassas sem substituição [29] [38] [28] [30] [39] [37]. Também o aumento do grau de finura das partículas do catalisador de FCC se traduz normalmente num aumento da resistência mecânica dos materiais onde são incorporados [27] [29] [22].

Nos estudos em que o resíduo catalítico de FCC substitui parcialmente o agregado fino em vez de o cimento, tanto em argamassas [27] [29] como em betões [31], constatou-se um aumento da resistência mecânica relativamente à dos materiais sem incorporação daquele resíduo porque se comporta como um *microfiller* activo.



## 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

---

### 3.1 INTRODUÇÃO

---

O programa experimental desenvolvido neste trabalho foi concebido de forma a verificar a possibilidade de utilizar catalisador exausto de FCC, obtido na refinaria de Sines da Petrogal, como material pozolânico na produção de cimentos. Neste sentido, preparam-se argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC tendo como objectivo último avaliar o efeito da fracção volumétrica do resíduo nas suas propriedades físicas e mecânicas, no estado fresco e endurecido. O procedimento experimental a seguir descrito foi elaborado de acordo com as normas NP EN 196-1:2006[40], EN 1015-3:1999[41], EN 1015-6:1998[42] e DIN 18555-2:1982[43]. As argamassas produzidas podem associar-se em quatro séries diferentes em função da sua composição:

- Argamassas de referência que incluem na sua composição cimento, areia e água (de acordo com a NP EN 196-1:2006), com e sem superplastificante;
- Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC tal como foi recebido da refinaria (misturas binárias);
- Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído, com e sem superplastificante (misturas binárias); e,
- Argamassas com substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural (misturas ternárias).

Na Figura 3.1 está ilustrado um resumo esquemático das argamassas preparadas e na Tabela 3.1 encontra-se sistematizada a designação adoptada para cada uma das argamassas em relação à composição, nas quais SP quer dizer superplastificante; rFCC significa resíduo de catalisador exausto de FCC, tal como recebido; rFCCm – quer dizer resíduo de catalisador exausto de FCC moído; e rPN significa resíduo de pedra natural.

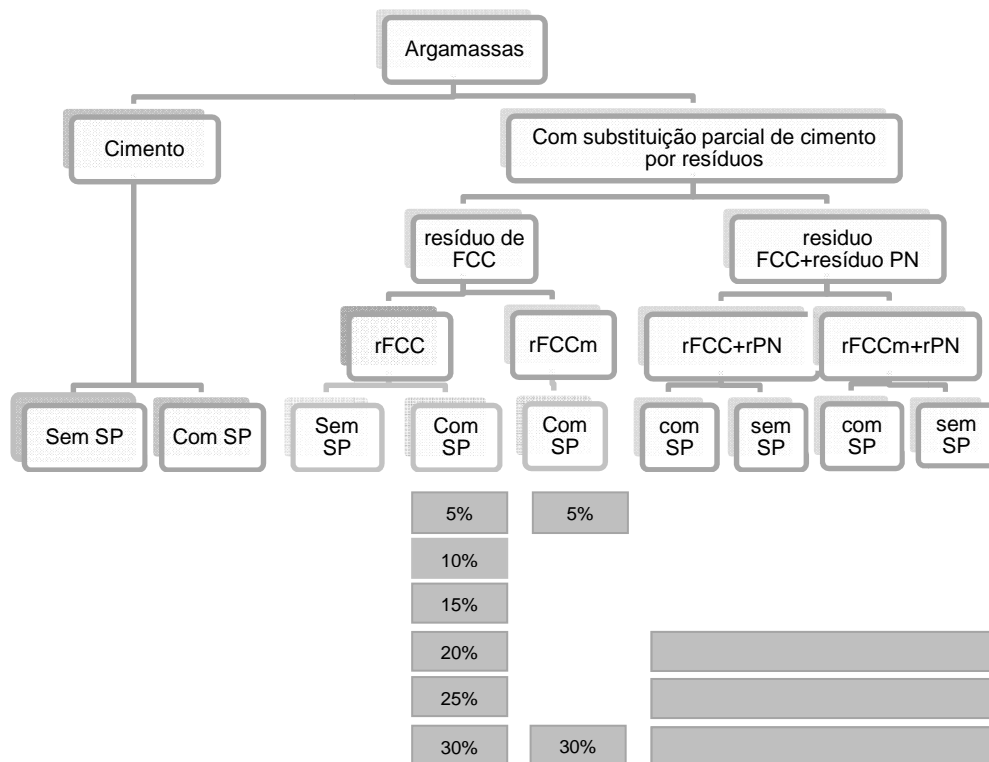


Figura 3.1 – Resumo esquemático das argamassas preparadas (SP – superplastificante; rFCC – resíduo de FCC tal como foi recebido; rFCCm – resíduo de FCC moído; rPN – resíduo de pedra natural).

Tabela 3.1 – Designação e composição das diversas argamassas produzidas

Designação das argamassas	Cimento (% mássica)	rFCC (% mássica)	rPN - resíduo pedra natural (% mássica)	SP (% mássica)
<b>Argamassas de referência</b>				
Ref. (C100_rFCC0)	100	0	0	0
Ref_SP (C100_rFCC0_SP)	100	0	0	0,5
<b>Argamassas com rFCC (tal como recebidos da refinaria)</b>				
C95_rFCC5	95	5	0	0,5
C90_rFCC10	90	10	0	0,5
C85_rFCC15	85	15	0	0,5
C80_rFCC20	80	10	0	0,5
C75_rFCC25	75	25	0	0,5
C70_rFCC30	70	30	0	0,5
<b>Argamassas com rFCC moídos</b>				
C95_rFCCm5	95	5	0	0,5
C70_rFCCm30	70	30	0	0,5
<b>Argamassas com rFCC e Resíduo de Pedra Natural</b>				
C80_rFCC,rPN20	80	8	12	
C75_rFCC,rPN25	75	10	15	
C70_rFCC,rPN30	70	12	18	
C80_rFCCm,rPN20	80	8	12	
C75_rFCCm,rPN25	75	10	15	
C70_rFCCm,rPN30	70	12	18	
C80_rFCC,rPN20_SP	80	8	12	0,5
C75_rFCC,rPN25_SP	75	10	15	0,5
C70_rFCC,rPN30_SP	70	12	18	0,5
C80_rFCCm,rPN20_SP	80	8	12	0,5
C75_rFCCm,rPN25_SP	75	10	15	0,5
C70_rFCCm,rPN30_SP	70	12	18	0,5

O programa de ensaios associado a cada argamassa preparada, incluiu a sequência de actividades que se encontra sistematizada na Tabela 3.2. Nas secções seguintes deste capítulo apresentam-se, mais pormenorizadamente, os materiais que se utilizaram (Subcapítulo 3.2) bem como, os protocolos experimentais (Subcapítulos 3.3 a 3.7) adoptados nos diferentes ensaios no estado fresco e endurecido.

Tabela 3.2 – Protocolo utilizado com cada amassadura

Actividade		Secção	
Preparação da argamassa (4 doses)		Subcapítulo 3.3	
Ensaio no estado fresco	Determinação da consistência	Secção 3.4.1	
	Determinação da massa volúmica	Secção 3.4.2	
	Determinação do teor em ar	Secção 3.4.3	
Moldagem e Compactação		Subcapítulo 3.5	
Desmoldagem, pesagem e identificação		Subcapítulo 3.6	
Ensaio no estado endurecido	Ensaio de compressão	2	
	Aos seguintes dias:	7	
		28	Secção 3.7.1
		56	
	Ensaio de flexão	90	

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na preparação das argamassas, especificamente cimento, areia, resíduo petroquímico, superplastificante e resíduo de pedra natural foram disponibilizadas, respectivamente, pelas empresas CIMPOR, SIFUCEL, PETROGAL, SIKA e GESTIN - Associação Gestora de Inertes. As fichas técnicas destes produtos encontram-se no Anexo B.

### 3.2.1 CIMENTO

Neste estudo foi utilizado um lote de cimento do tipo Portland CEM I-42,5R, produzido e cedido pela empresa CIMPOR. Este cimento apresenta na sua constituição uma percentagem de clínquer superior a 95%, em massa, e uma percentagem de constituintes adicionais minoritários inferior a 5%, que inclui sulfato de cálcio como regulador de presa (Anexo B).

O cimento é embalado em sacos de papel *kraft* de múltiplas folhas para proteger o cimento da humidade, mas que o protege pouco da acção directa da água. Se o cimento entrar em contacto com a água endurece antes do tempo, inviabilizando sua utilização [15]. No sentido de evitar o contacto com a água, os sacos de cimento foram armazenados no laboratório em local seco e protegido em *bidons* fechados para preservação da qualidade, e de forma que permita fácil acesso à inspecção e à identificação de cada lote.

### 3.2.2 SUPERPLASTIFICANTE

Em algumas argamassas foi utilizado o superplastificante SIKAPlast 898 de acordo com a recomendação do fabricante.

### 3.2.3 ÁGUA

A água é o elemento necessário a introduzir na preparação da argamassa para, em resultado da sua reacção química com o cimento, se formarem os saios minerais constituintes do cimento que, ao reagirem com a água, dão origem a uma série de compostos químicos hidratados capazes de conferir resistência mecânica à argamassa [44].

De acordo com a norma NP EN 196-1:2006 [39], neste estudo utilizou-se água desmineralizada no laboratório do ISEL.

### 3.2.4 AREIA

Não foi possível adquirir a areia com a mistura de composição granulométrica conforme a norma de avaliação da qualidade do cimento NP EN 196-1:2006 [40]. Foram, contudo, disponibilizados pela empresa Sifucel do grupo PARAPEDRA, diferentes lotes de areia (ver Anexo B) cuja composição química corresponde às exigências daquela norma. Este facto, permitiu que se peneirassem diversas fracções de areia e se preparasse areia, recorrendo a lotes diferentes, com a composição granulométrica da areia prevista na NP EN 196-1:2006. Esta areia (que corresponde aos requisitos químicos e físicos previstos na NP 196-1:2006), quando utilizada em argamassas, conduz a resultados mecânicos equivalentes aos obtidos para as argamassas nas quais se usa a areia normalizada (areia conforme NP EN 196-1:2006 produzida pela empresa *Société Nouvelle du Littoral* (SNL) [45] que é tipicamente usada pela indústria cimenteira. Para efeitos comparativos foi também preparada uma argamassa no Laboratório Central do Grupo Cimpor com a mesma composição mas recorrendo a areia normalizada. Todos os resultados das areias estão apresentados no ANEXO D. Na Tabela 3.3 apresenta-se a composição da areia que se utilizou na preparação das argamassas.

Tabela 3.3 – Composição da areia siliciosa utilizada na preparação das argamassas

Fracção granulométrica	1,6	1		0,5	0,16	0,08
Designação da areia	S – 50*	S – 50*	S – 30/40*	S – 30/40*	S - 30/40*	S – 90/100*
Peso (g)	95,45	177,26	177,26	463,64	272,73	163,64

(\*) Designação dada pela empresa Sifucel do grupo PARAPEDRA

### 3.2.5 RESÍDUO DE CATALISADOR EXAUSTO DE FCC

O resíduo de catalisador exausto de FCC utilizado neste estudo é um resíduo composto por zeólitos fabricados para a refinaria da Petrogal, em Sines, e fornecidos para este estudo por esta empresa.

Na Tabela 3.4 apresenta-se a composição química do cimento e do resíduo de catalisador exausto de FCC obtidas por espectrometria de fluorescência de Raios-X, num difractómetro laser da CILAS.

Os resultados mostraram que o teor de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no resíduo de catalisador de FCC é aproximadamente 92% w/w, que é típico de alguns materiais cimentícios suplementares usados na indústria de cimento [37].

Tabela 3.4 – Composição química e propriedades físicas do Cimento Portland e do resíduo de FCC utilizados[37].

Composição química(%)	Cimento Portland 42,5	rFCC
$\text{SiO}_2$	19.41	39.59
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5.40	52.81
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.23	0.55
$\text{CaO}_{\text{Total}}$	62.57	0.09
MgO	1.91	0.19
$\text{SO}_3$	2.89	0.23
$\text{K}_2\text{O}$	1.10	0.04
$\text{Na}_2\text{O}$	n.a.	0.68
$\text{Ti}_2\text{O}$ (Óxido de Titânio)	0.27	0.82
Óxido de Fósforo	0.10	0.06
$\text{Mn}_2\text{O}$	0.05	0.00
Óxido de Estrôncio	0.07	0.00
Perda ao fogo	2,70	1,49

#### Análise da distribuição de tamanho de partículas

A distribuição cumulativa do tamanho de partículas do cimento e do resíduo de catalisador de FCC foi determinada por difracção de laser usando um difractómetro laser da CILAS e encontra-se representada na Figura 3.2).

Como as partículas do resíduo do catalisador de FCC são mais grossas do que as do cimento, o seu efeito de *filler* não deverá ser significativo.

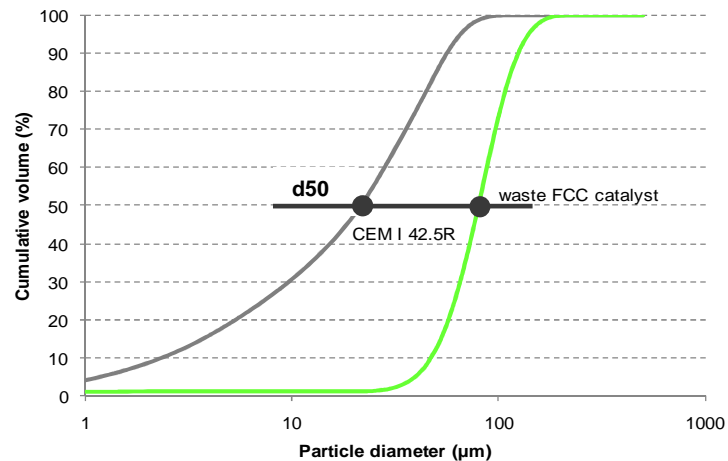


Figura 3.2 – Distribuição cumulativa de tamanho de partículas do cimento e do resíduo de catalisador de FCC [37].

### **TESTE DE FRATTINI**

Os resultados do teste de Frattini (obtidos de acordo com o procedimento especificado na norma NP EN 196-5:2006) estão representados na Figura 3.3.

O teste de Frattini é usualmente utilizado para avaliar a actividade pozolânica dos materiais, monitorizando a presença de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  numa solução. Na Figura 3.3 pode verificar-se o resultado do teste de Frattini do resíduo de catalisador de FCC que se encontra-se abaixo da curva de solubilidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , atribuído à sua actividade pozolânica. De facto, o resultado demonstra uma actividade pozolânica muito alta.

Na Tabela 3.5 estão representados os valores de OH<sup>-</sup> e de CaO, de acordo com a norma NP EN 196-5:2006. O resíduo de catalisador exausto de FCC é mais grosso pelo que se moeu à finura do cimento para se efectuar também o ensaio de pozolanicidade com este material moído, tal como sairia numa moagem de cimento.

Tabela 3.5 – Valores obtidos no Teste de Frattini para amostras de resíduo de FCC com um tempo de moagem de 12 segundos e de 6 segundos.

	<b>X</b>	<b>Y</b>
mmol/L	OH <sup>-</sup>	CaO
<b>Amostra 1391D (moagem 12s)</b>	43,1	3,7
<b>Amostra 1391D (moagem 6s)</b>	46	5,8

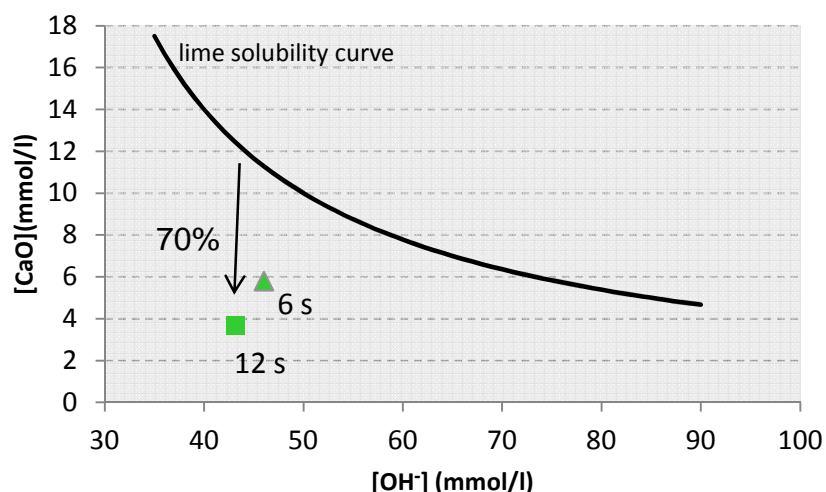


Figura 3.3 – Curva de solubilidade do calcário [37]

### 3.2.6 RESÍDUO DE PEDRA NATURAL

Utilizaram-se resíduos gerados, no centro do País, pela indústria extractora e transformadora de pedra natural (Anexo B). Os resíduos foram depositados no Aterro do Juncal sobre a forma de lamas e disponibilizados para o presente estudo pela GESTIN - Associação Gestora de Inertes.

Na Tabela 3.6 apresenta-se a composição química do cimento e do resíduo de pedra natural obtida por espectrometria de fluorescência de Raios-X, num equipamento *PANalytical* modelo *AXIOS* [46].

Tabela 3.6 – Composição química do cimento e do resíduo de pedra natural [46].

Chemical composition (%)	Cimento Portland 42,5	rPN
SiO <sub>2</sub>	19.41	1.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.45	0.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.23	0.17
CaO <sub>Total</sub>	62.57	54.35
MgO	1.91	0.37
SO <sub>3</sub>	2.89	0.08
K <sub>2</sub> O	1.10	0.04
Ti <sub>2</sub> O (Óxido de Titânio)	0.27	0.01
Óxido de Fósforo	0.10	0
Mn <sub>2</sub> O	0.05	0
Óxido de Estrôncio	0.07	0.01
Na <sub>2</sub> O	n.a.	n.a.

#### Análise da distribuição de tamanho de partículas

A distribuição cumulativa do tamanho de partículas do cimento e do resíduo de pedra natural foi

determinada por difracção de laser usando um difractómetro PANalytical X'Pert PRO e encontra-se representada na Figura 3.4.

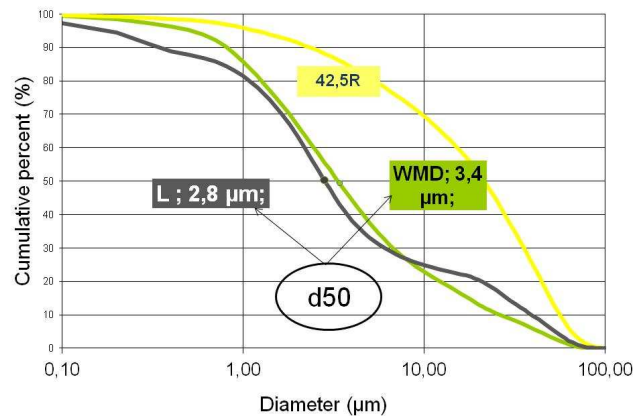


Figura 3.4 – Distribuição cumulativa de tamanho de partículas do cimento e do resíduo de pedra natural [46].

### 3.3 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Neste trabalho prepararam-se argamassas com diferentes composições que, como já foi referido anteriormente, se podem associar em 4 séries diferentes:

- Argamassas de referência que incluem na sua composição cimento, areia e água (de acordo com a NP EN 196-1:2006 [40]), com e sem superplastificante;
- Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC tal como foi recebido da refinaria;
- Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído, com e sem superplastificante; e,
- Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural.

A notação adoptada para as argamassas encontra-se sistematizada na Tabela 3.1, anteriormente descrita.

O equipamento utilizado na preparação de argamassas foi um misturador de pá, da marca Controls, modelo PL5M, com número de série 22062. Este misturador é constituído por um recipiente em aço inoxidável com uma capacidade de cerca de 5 litro, com forma e dimensões indicadas na Figura 3.5. A pá misturadora é accionada por um motor eléctrico com duas velocidades (lenta:  $140 \pm 5$  rot/min; rápida:  $285 \pm 10$  rot/min), num movimento de rotação sobre si mesma, acompanhado de um movimento planetário em torno de si mesmo [44].



Procurou-se também garantir idênticas condições de execução, minimizando a variabilidade inerente à sua execução.

Tendo-se concluído que a preparação da argamassa numa quantidade quatro vezes superior à prevista na norma dá origem a resultados reprodutíveis estabilizou-se na utilização das seguintes quantidades dos materiais constituintes, para cada amassadura:

- 900g de água desmineralizada;
- 1800g de cimento; ou 1800g de cimento e resíduo de catalisador exausto de FCC; ou 1800g de cimento, resíduo de catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural;
- 5400 kg areia normalizada;
- SP (quando utilizado).

Os protocolos de preparação das argamassas, quando se adiciona ou não superplastificante, encontram-se sistematizados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Protocolo utilizado na preparação das argamassas sem e com superplastificante.

<b>Protocolos preparação de argamassas</b>	
<b>Sem superplastificante</b>	<b>Com superplastificante</b>
1. Colocar água no recipiente do misturador.	1. Colocar no recipiente do misturador 2/3 da quantidade de água e superplastificante.
2. Ligar o misturador na velocidade lenta (140 rotações/minuto) com o recipiente anteriormente referido.	
3. Introduzir o ligante durante 60 segundos.	3. Durante 60 segundos introduzir regularmente o ligante e no fim 1/3 de água.
4. Misturar durante 60 segundos.	
5. Introduzir a areia durante 60 segundos.	
6. Alterar misturador para velocidade rápida (285 rotações/minuto) e deixar a argamassa misturar durante 60 segundos.	
7. Parar o misturador durante 90 segundos e retirar por meio de uma espátula toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente e colocá-la no meio deste.	
8. Continuar a amassadura na velocidade rápida durante 90 segundos.	

Os tempos e sequência de introdução dos constituintes em cada amassadura, referidos no protocolo anterior, encontram-se esquematizados na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Esquema dos tempos e sequência de introdução dos constituintes, em cada amassadura.



### 3.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Quando se junta cimento e água, começa imediatamente a ocorrer uma série de reacções químicas que transformam progressivamente a argamassa numa matriz sólida. Este processo tem associado perda de plasticidade da mistura até atingir a “presa” que consiste na rigidificação do material, tornando-o não deformável, ainda que a sua resistência à compressão. Considera-se que os materiais à base de cimento estão no estado fresco quando ainda apresentam comportamento plástico[44]. Deste modo, consideram-se ensaios no estado fresco aqueles que são realizados imediatamente após a amassadura.

Com as argamassas no estado fresco, foram realizados os ensaios de índice de consistência, massa volúmica e teor de ar incorporado. Em todas as amassaduras efectuadas foram realizados os ensaios no estado fresco.

#### 3.4.1 ENSAIO PARA DETERMINAR A CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS: MESA DE ESPALHAMENTO

Em todas as amassaduras preparadas, a sequência de elaboração dos ensaios foi sempre a mesma, iniciando-se sempre cada plano de ensaios com o ensaio da mesa de espalhamento com a argamassa no estado fresco.

Este ensaio – realizado de acordo com a norma europeia EN1015-3:1999[41] - consiste na determinação da consistência da argamassa no estado fresco.

A consistência é uma medida da fluidez da argamassa fresca, medindo a deformação da argamassa quando sujeita a forças exteriores.

Ao contrário de alguns estudos que pré-definem um valor de espalhamento para as argamassas, nesta campanha experimental foi fixado o valor de massa de água (de acordo com norma NP EN 196-1:2001 [40]) e o valor de massa de superplastificante adicionados à mistura. Variando-se as

percentagens de substituição parcial do cimento obteve-se o valor da mesa de espalhamento das argamassas.

Na Figura 3.7 está ilustrado um esquema com as dimensões da mesa de espalhamento da marca Controls e modelo L0040/A (com o número de série 03010138) e uma imagem da mesa de espalhamento utilizada no laboratório do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

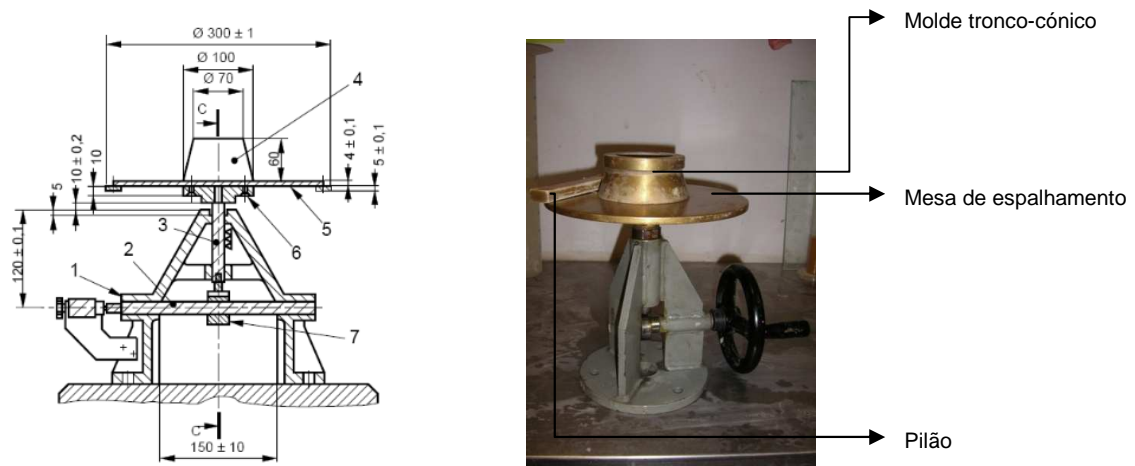


Figura 3.7 – Esquema [41] da mesa de espalhamento e fotografia da mesa de espalhamento utilizada neste estudo.

Depois da homogeneização da argamassa no misturador de pá, fez-se o ensaio da mesa de espalhamento que consistiu na colocação de argamassa até metade da capacidade do molde tronco-cónico (Figura 3.7) que foi previamente colocado sobre a mesa de espalhamento (Figura 3.8-A). Compactou-se em seguida com 10 pancadas com um pilão (Figura 3.7). Voltou-se a preencher o restante volume com argamassa, terminando com 10 pancadas com o pilão sobre este. Rasurou-se com uma régua metálica para retirar o excesso (Figura 3.8-B). Retirou-se o recipiente (Figura 3.8-C) e fez-se rodar o manípulo 15 vezes à velocidade de uma pancada por segundo. No final, mediu-se com a régua o diâmetro do espalhamento em direcções ortogonais, obtendo-se assim o valor do espalhamento da argamassa como sendo a média aritmética destas duas medidas. Na Tabela 3.9. apresenta-se a sistematização do protocolo experimental usado.

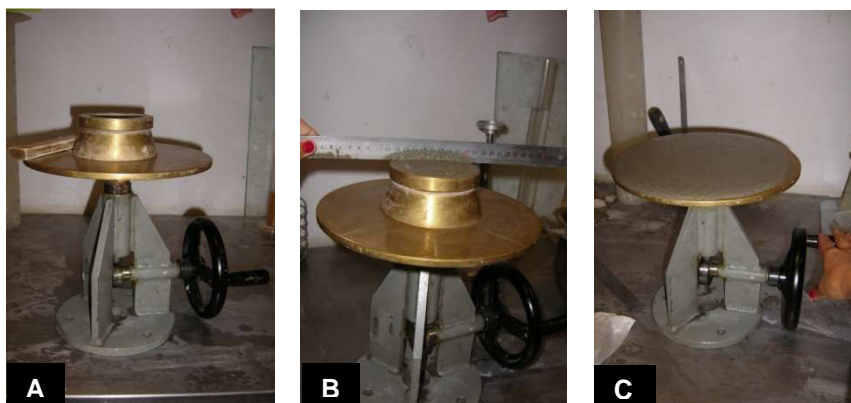


Figura 3.8 – Equipamento do ensaio da mesa de espalhamento.

Tabela 3.8 – Protocolo utilizado no ensaio da mesa de espalhamento

1. Coloca-se o recipiente centrado na mesa de espalhamento
2. Introdz-se argamassa até metade da capacidade do recipiente
3. Compacta-se em seguida com 10 pancadas
4. Preencher o restante volume com argamassa
5. Termina-se com 10 pancadas sobre a argamassa do recipiente
6. Rasura-se com uma régua metálica para retirar o excesso
7. Retira-se o recipiente e faz-se rodar o manípulo 15 vezes à velocidade de uma pancada por segundo
8. Mede-se com a régua o diâmetro do espalhamento em direcções ortogonais, obtendo-se o espalhamento da argamassa como sendo a média aritmética deste dois valores

### 3.4.2 MASSA VOLÚMICA

Tal como o ensaio da mesa de espalhamento, o ensaio para determinação da massa volúmica também foi efectuado para todas as argamassas e imediatamente a seguir ao ensaio da mesa de espalhamento. A massa volúmica das argamassas no estado fresco foi determinada de acordo com a norma EN 1015-6:1998[42]. Segundo esta norma, em primeiro lugar deve-se determinar a massa do recipiente que no presente caso era a base do aerómetro, utilizado para o ensaio de teor em ar descrito a seguir na secção 3.4.3 - e apresentava um volume (V) de 0,750 litro.

Colocou-se a argamassa fresca até metade da capacidade da referida base. De seguida, procedeu-se ao levantamento alternado de cada um dos bordos do recipiente de modo a que ao largar-se o bordo suspenso, a respectiva queda garantia a compactação da argamassa. Fez-se este movimento dez vezes com o objectivo de distribuir de forma uniforme a argamassa e de se

obter a superfície plana. Perfez-se a restante capacidade do recipiente com argamassa e voltou-se a repetir o passo acima descrito. Rasurou-se o excesso com auxílio de uma régua metálica e determinou-se a massa do recipiente com argamassa. Com estas massas pode-se determinar a massa volúmica, calculada através da seguinte expressão:

$$Mv = \frac{M(\text{base} + \text{argamassa}) - M \text{ base}}{V \text{ base}} \quad (3.1)$$

Em que:

**Mv** = massa volúmica

**M (base)**: massa da base = 1126 g

**M (base + argamassa)** = Valor obtido da balança

**V (base)**: volume da base = 0,750 l

O protocolo para o procedimento que permite a determinação da massa volúmica apresenta-se descrito na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Protocolo utilizado na determinação da massa volúmica

1. Colocar a argamassa até metade da capacidade da referida base
2. Compactar, num movimento de levantamento alternado de cada um dos bordos, deixando-os cair em queda livre. Repete-se dez vezes.
3. Perfez-se a restante capacidade do recipiente com argamassa e volta-se a repetir o passo acima descrito.
4. Rasura-se o excesso de argamassa, relativamente à extremidade da base do aerómetro, com auxílio de uma régua metálica.
5. Pesa-se a base do aerómetro com argamassa

### 3.4.3 ENSAIO DE TEOR EM AR

O teor em ar corresponde aos vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa. Neste trabalho, o teor de ar foi avaliado para todas as composições de argamassas. O teor de ar

das argamassas, apesar de favorecer a sua trabalhabilidade, actua de forma desfavorável em relação às resistências mecânicas.

Imediatamente a seguir à determinação das massas necessárias para o cálculo da massa volúmica, procedeu-se ao ensaio para obter o teor em ar da argamassa, aproveitando-se o recipiente cheio com a argamassa para dar início ao ensaio.

Este ensaio foi elaborado tendo como referência o disposto na Norma DIN 18555-2:1982 [43] e com o equipamento – aerómetro - que pode ser observado na Figura 3.9.

O protocolo de ensaio adoptado encontra-se sistematizado na Tabela 3.10.



Figura 3.9 – Equipamento de ensaio de determinação do teor em ar

Tabela 3.10 – Protocolo utilizado na determinação do teor em ar

1. Depois do ensaio de massa volúmica, com a base do aerómetro preenchida de argamassa, limpa-se a extremidade da base para que o aerómetro encoste directamente na parte metálica da base, livre de calda, permitindo assim uma vedação perfeita do conjunto;
2. Fecham-se as cavilhas;
3. Injecta-se água pela válvula da esquerda e quando a água sair pela outra válvula em fluxo contínuo, fechar as duas ao mesmo tempo - momento de saturação da amostra;
4. Libertar a bomba de pressão e accioná-la até que o ponteiro ultrapasse a marca vermelha;
5. Corrige-se o ponteiro ao valor “zero” através do botão de descompressão (botão de cor preta);
6. Prime-se o botão de teste (botão de cor verde) para que seja efectuado o teste;
7. Regista-se o valor do teor em ar da amostra, indicado pelo ponteiro do aerómetro.

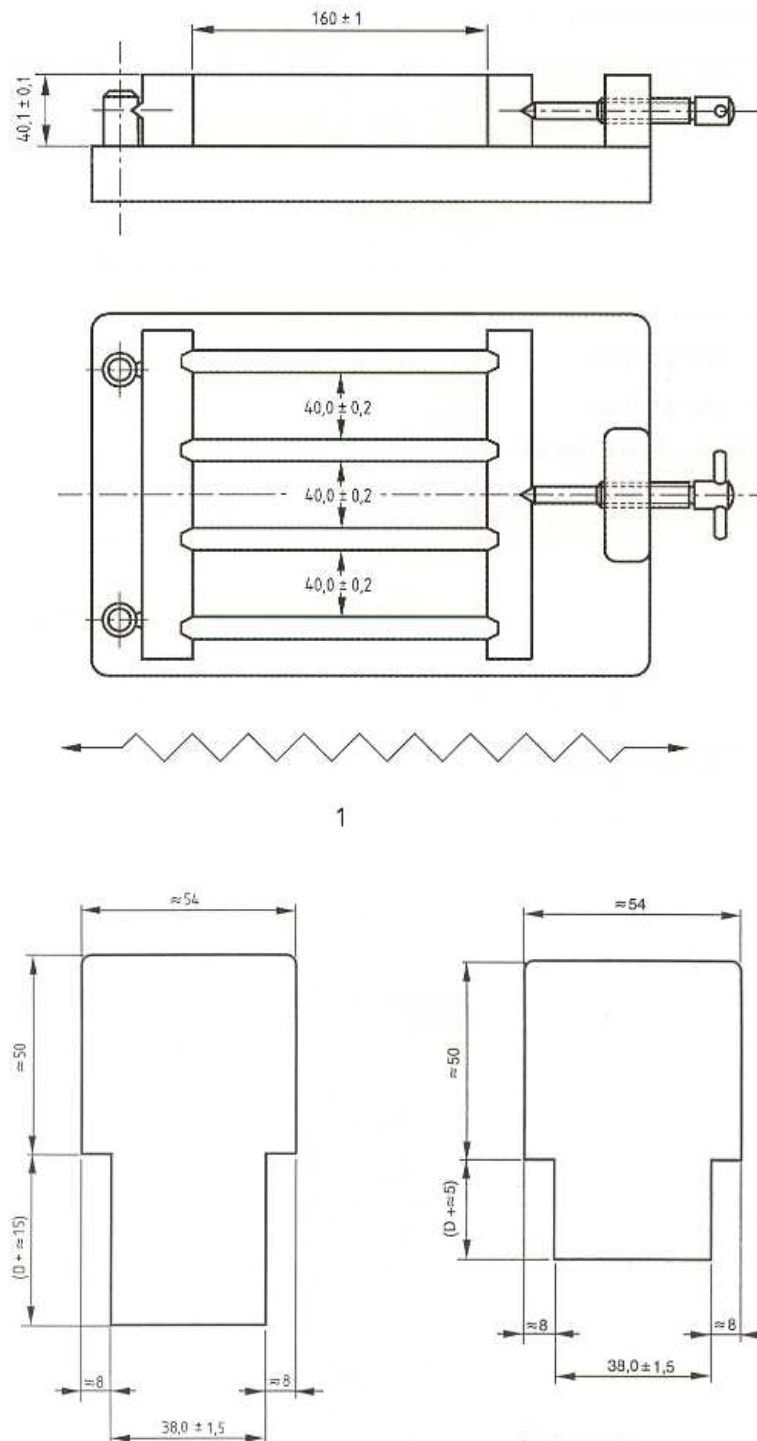
### 3.5 MOLDAGEM E COMPACTAÇÃO

---

Para a realização dos ensaios da argamassa no estado endurecido – determinação das resistências mecânicas - procedeu-se à produção de provetes de dimensão 40 x 40 x 100 [mm x mm x mm]. Obtiveram-se estes provetes através do procedimento a seguir descrito, de acordo com a norma NP EN 196 – 1:2006[40].

Colocou-se um molde (Figura 3.11-A) no compactador e colocou-se a prolonga no topo do molde, fixando este conjunto à base do compactador com as respectivas fixações. De seguida, preencheu-se o molde com a restante argamassa. Este preenchimento é realizado em duas fases: na primeira enchem-se os compartimentos do molde até metade e regulariza-se a camada de argamassa com a espátula grande (Figura 3.10), mantida verticalmente relativamente ao molde com os seus bordos em contacto com a parte superior da prolonga, retirando a argamassa em excesso. Findo este procedimento para os três compartimentos do molde, liga-se o compactador (Figura 3.13) que efectua, automaticamente, 60 pancadas em 60 segundos. De seguida enche-se o restante volume de cada compartimento do molde e regulariza-se novamente - desta vez com a espátula pequena (Figura 3.10) - e levou-se novamente ao compactador (Figura 3.13) para igual número de pancadas. Depois das 60 pancadas retirou-se a prolonga (Figura 3.13) e, com precaução, retirou-se para uma bancada o molde do compactador e rasurou-se com uma régua metálica para retirar a argamassa em excesso (Figura 3.11-B).

Efectuou-se este procedimento para os três moldes.



1

Figura 3.10 – Esquema com dimensões dos moldes e espátula grande e espátula pequena [39].

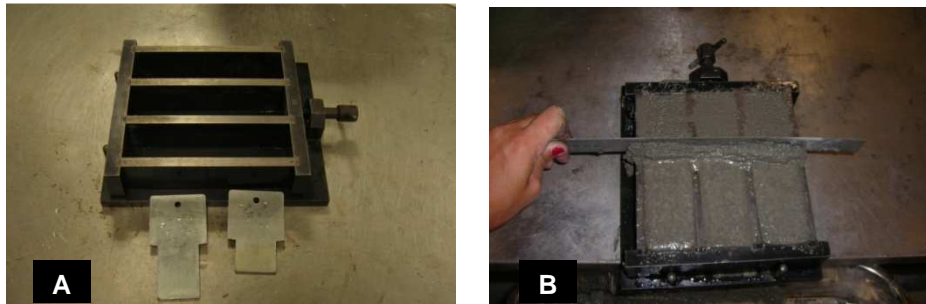


Figura 3.11 – Molde (A) e moldagem (B) dos provetes.

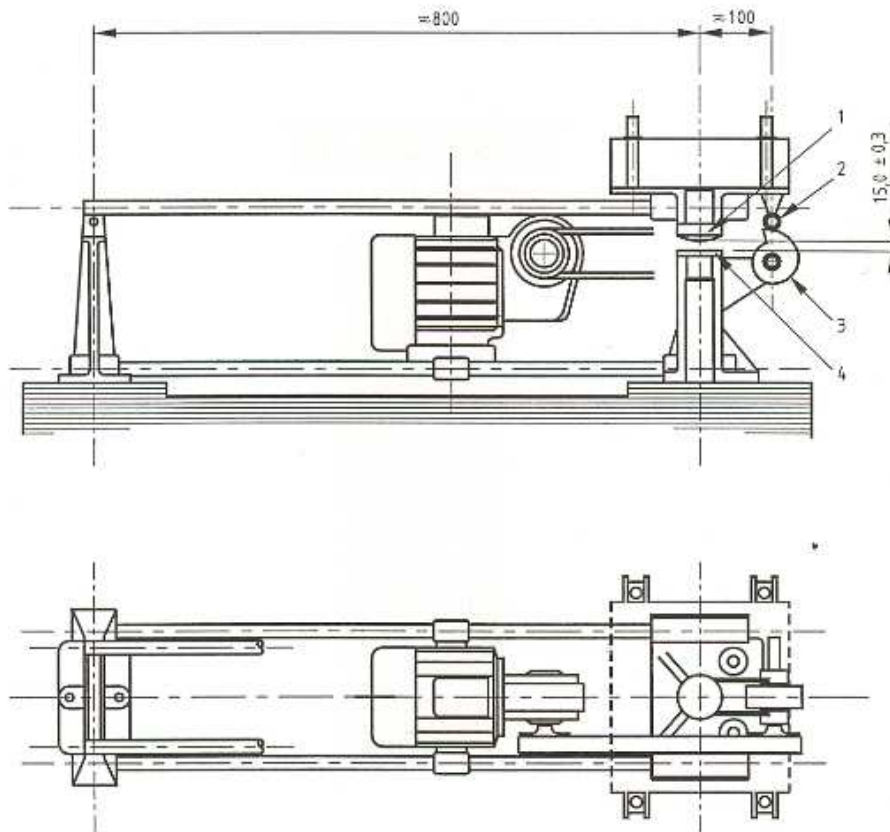


Figura 3.12 – Esquema com dimensões do compactador (dimensões em milímetros) [40].



Figura 3.13 – Compactador dos provetes, com prolonga que é colocada no compactador.

### 3.6 DESMOLDAGEM, PESAGEM E IDENTIFICAÇÃO

Os nove moldes compactados, obtidos do procedimento descrito na secção anterior, foram devidamente identificados e colocados sob uma placa de vidro num suporte horizontal numa câmara de cura com condições de temperatura e humidade controladas, com valores de 24°C e 83%, respectivamente.

Depois de decorridas 24 horas da moldagem dos provetes, procedeu-se à sua desmoldagem (Figura 3.14). Marcaram-se convenientemente os nove provetes, resultantes de cada amassadura, pesaram-se e conservaram-se em água a uma temperatura de  $(20,0 \pm 1,0)$  °C, devidamente afastados uns dos outros (Figura 3.15).



Figura 3.14 – Provetes depois de desmoldados (A e B) e identificados (B).



Figura 3.15 – Armazenagem dos provetes em água.

### 3.7 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

---

No estado endurecido, os ensaios realizados foram resistência à tracção na flexão e resistência à compressão.

#### 3.7.1 DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Os ensaios de resistência mecânica – flexão e compressão – estão normalizados na norma NP EN 196-1:2006[40].

- Idade dos provetes para ensaios de resistência mecânica:

A idade dos provetes é calculada a partir do momento da amassadura dos constituintes da argamassa. Nesta campanha experimental efectuaram-se ensaios para os 2, 7 e 28 dias em argamassas com substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e de pedra natural e em argamassas substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC, para além dos ensaios nestes dias, também se efectuaram ensaios aos 28, 56 e 90 dias, sendo que neste caso, os ensaios aos 28 dias se repetiam para confirmar a reprodutibilidade das duas amassaduras.

Os ensaios foram sempre efectuados dentro dos seguintes limites:

Ensaio aos 2 dias: 48h ± 30 min

Ensaio aos 7 dias: 7d ± 45 min

Ensaio aos 28 dias: ≥28d ± 8h

- ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Para a determinação da resistência à flexão utilizou-se a máquina de ensaios de resistência à flexão da marca Controls e modelo L11D2, com o número de série 99010083 (Figura 3.16 e Figura 3.17).

O ensaio de flexão efectuou-se de acordo com a norma NP EN 196-1:2006 e inicia-se com a colocação de cada um dos três provetes nos dois cilindros de apoio da máquina de ensaios de resistência à flexão, com o eixo longitudinal perpendicular aos apoios. A carga foi aplicada verticalmente por um terceiro cilindro equidistante dos outros dois cilindros de apoio (Figura 3.14), que após entrar em contacto com o provete originava a rotura do mesmo.

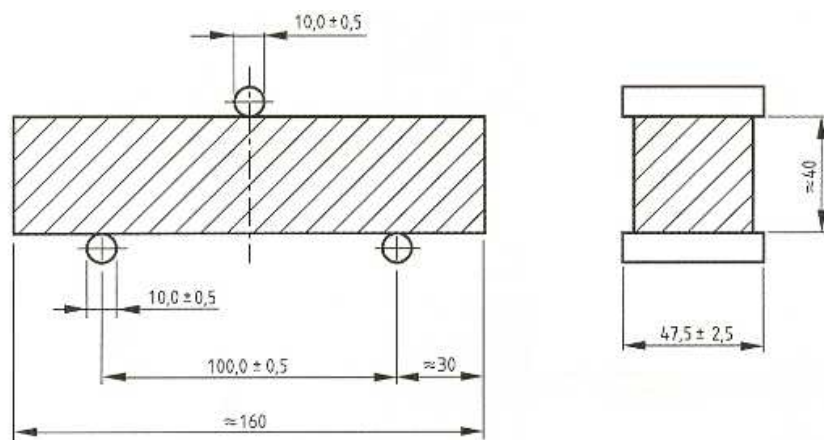


Figura 3.16 – Esquema com dimensões do equipamento de ensaio à flexão e posicionamento do provete nos cilindros deste equipamento [40].

Repetiu-se este procedimento para os restantes provetes e conservaram-se os semi-prismas obtidos para o ensaio à compressão. Registou-se o valor obtido para determinar a resistência à flexão de cada provete, em megapascal, pela fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (3.2)$$

Onde:

$R_f$  é a resistência à flexão, em megapascal;

$b$  é o lado da secção quadrada do prisma, em milímetro (40 x 40);

$F_f$  é a carga aplicada ao centro do prisma na rotura, em Newton;

$l$  é a distância entre os apoios, em milímetro (100 mm)

Considera-se a resistência à flexão de cada argamassa como sendo a média aritmética dos valores de resistência à flexão obtida em relação aos (no mínimo três) provetes de cada argamassa ensaiados.



Figura 3.17 – Equipamento de ensaio para determinar resistência dos provetes à flexão (A) e provetes depois de ensaiados (B).

- ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão efectua-se de acordo com a norma NP EN 196-1:2006 [18] no equipamento usado no ensaio de resistência à flexão. O ensaio inicia-se com a colocação de um semi-prisma obtido no ensaio à flexão (Figura 3.17-B) no prato da prensa, garantindo-se que os pratos ficavam em contacto com as faces regulares dos provetes (Figura 3.18). Ligou-se a prensa e iniciou-se a descida do prato superior da máquina até estabelecer contacto com a face superior do semi-prisma. Accionou-se o manípulo da prensa para se introduzir um aumento gradual da força no provete, de forma contínua e sem choques, até ao momento da rotura. Repetiu-se este procedimento para os restantes 5 semi-prismas.

Registou-se o valor obtido em cada semi-prisma para determinar a resistência à compressão, em megapascal, pela fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.3)$$

Em que:

$R_c$  é a resistência à compressão, em megapascal;

$F_c$  é a carga máxima na rotura, em newton;

1600 é a área dos pratos (40 mm x 40 mm), em milímetro quadrado.

Considera-se a resistência à compressão de cada argamassa como sendo a média aritmética dos valores de resistência à compressão obtida em relação aos (no mínimo seis) provetes de cada argamassa ensaiados.



Figura 3.18 – Equipamento para o ensaio de determinação da resistência à compressão.

Na Figura 3.19 pode-se observar os provetes depois de ensaiados e o seu armazenamento num excicador, que garante a preservação das suas características, para serem sujeitos a outros ensaios que não estão incluídos neste estudo.

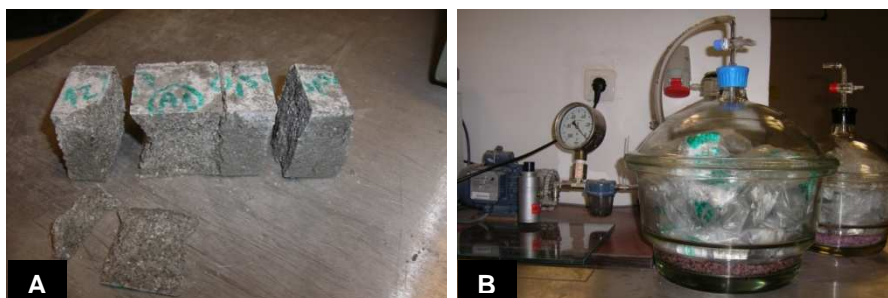


Figura 3.19 – Provetes depois de ensaiados (A) e excicador (B) onde os provetes são guardados depois de ensaiados.

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

---

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos na campanha experimental (descrita no Capítulo 3). Os resultados são analisados e discutidos, de forma a avaliar o efeito da substituição parcial de cimento por catalisador exausto de FCC (Subcapítulo 2.3 e Secção 3.2.5) nas propriedades dos produtos finais em que são utilizados. Neste sentido, realizaram-se ensaios em argamassas no estado fresco – que incluíram a determinação da consistência, massa volúmica e teor em ar (Subcapítulo 3.4) – e, no estado endurecido que incluíram a determinação das resistências mecânicas, à flexão e à compressão, para vários tempos de hidratação (Secção 3.7.1). Realizaram-se, ainda, estudos preliminares para avaliar o efeito, nas mesmas propriedades, da substituição parcial do cimento por: (i) catalisador exausto de FCC mas com um tamanho de partícula menor (isto é, depois de moído) e, (ii) em simultâneo por dois resíduos, o catalisador de FCC e ainda um resíduo resultante da indústria da transformação de pedra natural (Secção 3.2.6).

Como foi referido no Capítulo 3, as argamassas foram preparadas, tanto quanto possível de acordo com a norma NP EN 196-1:2006 [40] (fazendo as adaptações necessárias para incluir a incorporação do(s) resíduo(s) e a adição de superplastificante), seguindo sempre a mesma ordem de introdução dos constituintes e com os mesmos tempos de mistura, tendo apenas como variável o teor de substituição de cimento por catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido ou depois de moído), ou por este e por resíduo de pedra natural.

As argamassas preparadas podem agrupar-se da seguinte forma:

- Argamassas de referência, nas quais não há incorporação de substituto de cimento, tendo-se preparado uma com superplastificante e outra sem superplastificante;
- Argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC tal como recebido da refinaria;
- Argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC depois de moído;
- Argamassas com substituição parcial do cimento, em simultâneo, por resíduo de catalisador exausto de FCC e por resíduo de pedra natural.

A designação adoptada para cada uma destas argamassas encontra-se na Tabela 3.1 do Capítulo 3.

A apresentação dos resultados experimentais será efectuada de acordo com a ordem definida na Tabela 3.2 do Capítulo 3, recorrendo, sempre que possível, a tabelas e gráficos concebidos com

uma apresentação gráfica coerente e uniforme (por exemplo, a mesma formulação de cimento aparece sempre representada com a mesma cor) para facilitar a análise comparativa e a discussão crítica dos resultados experimentais de cada ensaio para as diferentes formulações de cimento, nomeadamente em relação à argamassa de referência (sem incorporação de resíduo), bem como na perspectiva de avaliar o modo como as diferentes propriedades das argamassas se relacionam entre si.

O registo integral dos resultados obtidos para cada ensaio da campanha experimental que foram submetidos a tratamento, referentes a cada formulação, são apresentados no ANEXO D.

## 4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

---

Neste subcapítulo apresentam-se, analisam-se e discutem-se os resultados experimentais que se obtiveram nos ensaios das argamassas no estado fresco e que incluíram a determinação da consistência, da massa volúmica e do teor em ar. Os resultados obtidos em cada um destes ensaios experimentais são apresentados em secções distintas consecutivas – uma para cada um dos grupos de argamassas preparados, e referidos atrás (Tabela 3.1), – e comparados com os resultados das argamassas sem incorporação de resíduos.

### 4.1.1 CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

A determinação da consistência por espalhamento é um ensaio que é realizado no estado fresco das argamassas, ou seja, quando esta ainda não ganhou presa, como forma de avaliar a fluidez. Em termos práticos, este ensaio realiza-se logo após o fim da amassadura.

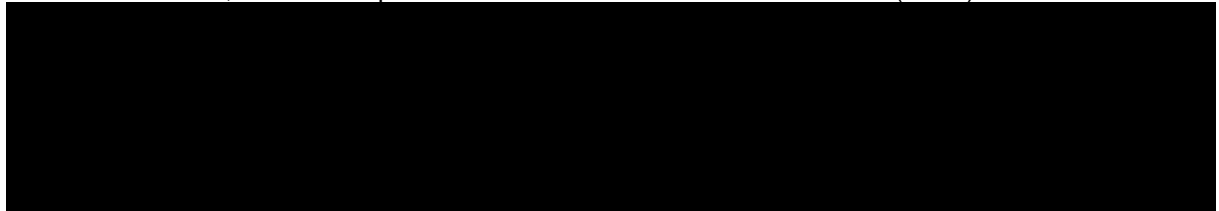
Neste trabalho determinou-se a consistência de todas as argamassas preparadas (Tabela 3.1) recorrendo à mesa de espalhamento seguindo o protocolo experimental descrito na Secção 3.4.1.

#### 4.1.1.1 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC

Na Tabela 4.1 encontram-se sistematizados os resultados dos ensaios de mesa de espalhamento realizados usando as argamassas de referência e as argamassas com substituição parcial, de cimento por 5, 10, 15, 20, 25 e 30% de resíduo de catalisador exausto de FCC, tal como foi recebido da refinaria de Sines. Apresenta-se também a variação do valor de espalhamento das argamassas com incorporação de resíduo em relação à argamassa de referência. Estes resultados encontram-se representados na Figura 4.1. Todos os resultados obtidos nesta campanha experimental encontram-se no ANEXO D.

Note-se que, como na preparação das argamassas com incorporação de resíduo se adicionou superplastificante, a argamassa de referência com as quais devem ser comparadas é a que também tem superplastificante.

Tabela 4.1 – Resultados de consistência obtidos pelo ensaio da mesa de espalhamento (em milímetros) das argamassas de referência e com substituição parcial, entre 5 e 30%, de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (rFCC).



A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio da mesa de espalhamento para a argamassa de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:  $\left(\frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100\right) - 100$

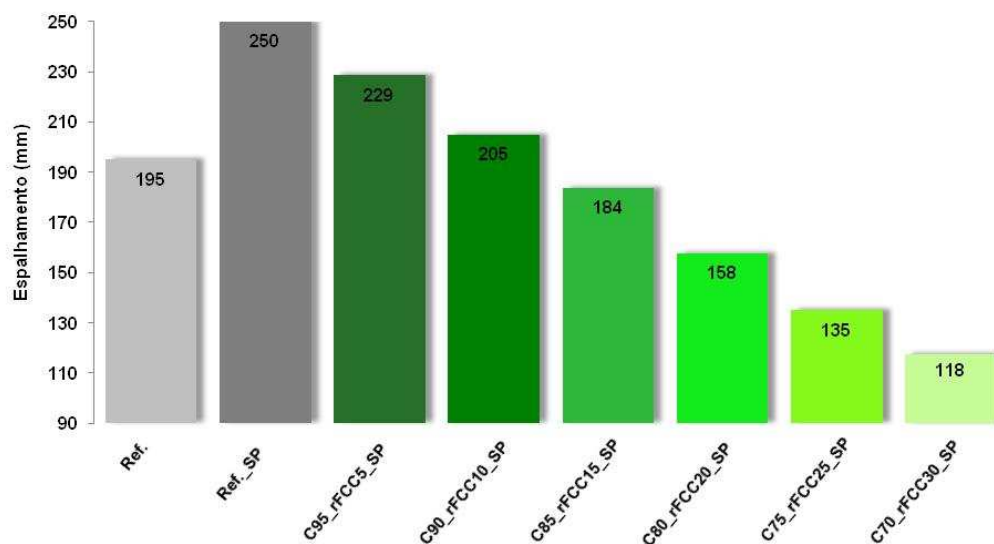
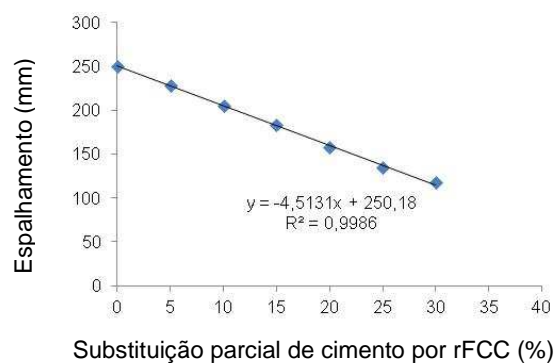


Figura 4.1 – Representação gráfica dos valores de consistência (em milímetros) obtidos no ensaio de mesa de espalhamento das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial, entre 5 e 30%, de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (rFCC).



Na análise dos valores de espalhamento obtidos - que se apresentam na Tabela 4.1 e representam na Figura 4.1 - verifica-se que a argamassa sem incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC (mas com adição de SP) apresenta maior valor de espalhamento e este diminui linearmente com o aumento do teor de substituição do cimento de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{Espalhamento (mm)} = - 4,51 \times \begin{array}{l} \% \text{ de substituição de cimento} \\ \text{por resíduo de FCC (\%)} \end{array} + 250,18 \quad (4.1)$$

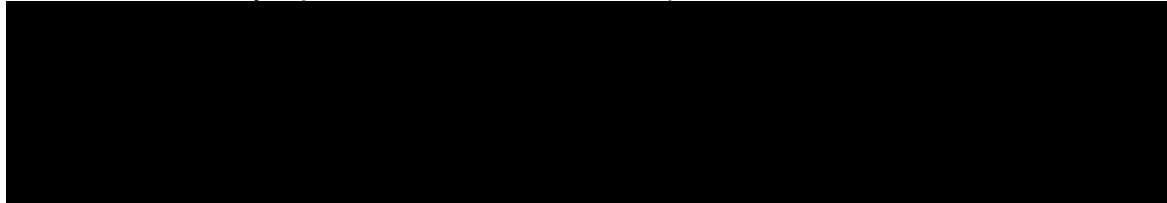
Este efeito diminuição da fluidez das argamassas à medida que o teor de incorporação de resíduo aumenta já tinha sido observado noutros estudos[29] e deve-se à elevada área superficial específica que resíduos catalíticos de FCC apresentam[29] e à sua estrutura porosa, o que conduz a uma grande absorção de água.

Embora a fluidez das argamassas diminua à medida que a incorporação de resíduo de FCC aumenta, verificou-se que a substituição de cimento por resíduo catalítico até 20% em massa, inclusive, deu origem a argamassas homogêneas, coesas e trabalháveis. O mesmo não se verificou para as argamassas com percentagens de substituição de 25 e 30% com reflexos nos valores de resistência mecânica obtidos que se apresentam na secção 4.2.

#### **4.1.1.2 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído**

Como foi referido no início deste capítulo, além de resíduo de catalisador exausto de FCC utilizado tal como foi recebido da refinaria de Sines, também se preparam argamassas nas quais o cimento foi parcialmente substituído, em 5 e 30%, por resíduo de catalisador exausto FCC moído, (tal como descrito no subcapítulo 3.1). Na Tabela 4.2 encontram-se sistematizados os resultados de consistência dessas argamassas obtidos nos ensaios de espalhamento realizados e das argamassas de referência, bem como, a variação do valor de espalhamento das argamassas com incorporação de resíduo em relação à argamassa de referência. Estes resultados encontram-se também representados na Figura 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de consistência (em milímetros) obtidos no ensaio de mesa de espalhamento para as argamassas de referência e para argamassas com substituição parcial de 5 e 30% de cimento por resíduo de FCC moídos.



A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio de mesa de espalhamento para a argamassa de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:  $\left(\frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100\right) - 100$

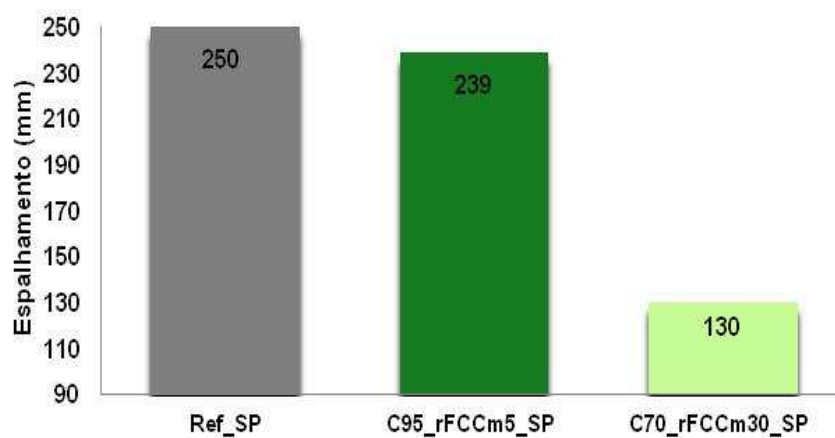
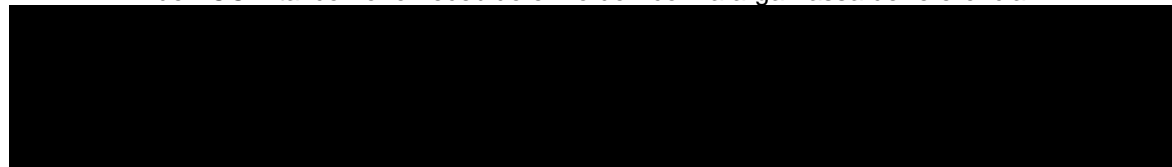


Figura 4.2 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento comparando as argamassas com substituição parcial de 5 e 30% de cimento por resíduo de FCC moídos com as argamassas de referência sem incorporação de resíduo.

Na Tabela 4.3 reproduzem-se, para facilidade de comparação, os resultados de consistência (que se apresentaram anteriormente na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento para a argamassa de referência com superplastificante e para as argamassas com substituição parcial de cimento - 5% e 30% - por resíduo de FCC moído, bem como os valores de consistência das argamassas as mesmas percentagens de substituição de cimento com o resíduo de FCC, tal como recebido da refinaria. Apresenta-se também a variação do valor de espalhamento das argamassas com incorporação de resíduo em relação à argamassa de referência. Os valores da Tabela 4.3 encontram-se representados na Figura 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de consistência (em milímetros) obtidos no ensaio de mesa de espalhamento (reproduzidos das Tabelas 4.1 e 4.2), comparando as argamassas com substituição parcial 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.



A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio da mesa de espalhamento para a argamassa de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:  $\left( \frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100 \right) - 100$

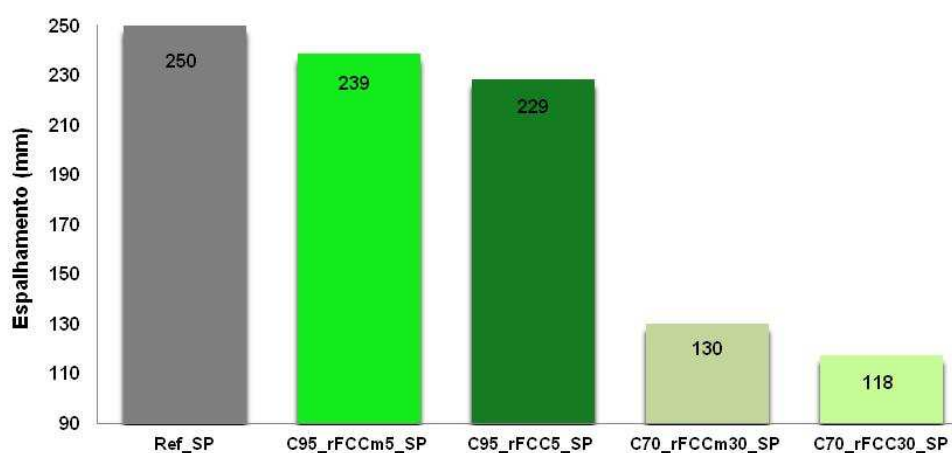


Figura 4.3 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento, comparando as argamassas com substituição parcial de 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.

#### 4.1.1.3 Argamassas com incorporação simultânea de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural

A substituição parcial de cimento por resíduos catalíticos de FCC traduz-se como se viu atrás (secção 4.1.1.1 e secção 4.1.1.2) na perda de fluidez das argamassas nas quais são usados, à medida que se aumenta a percentagem de substituição de resíduo. Uma vez que os *fillers* de calcário podem ter o efeito contrário, conduzindo ao aumento da fluidez (Subcapítulo 2.3), e tendo sido este o efeito verificado em relação a resíduos da transformação da pedra natural fornecidos pela empresa PARAPEDRA [21], prepararam-se argamassas com incorporação dos dois resíduos: do catalisador exausto de FCC e do resíduo de PN, para avaliar se da sinergia da presença simultânea dos dois resíduos podia haver diminuição da quantidade de superplastificante que se tem que utilizar nos cimentos que são parcialmente substituídos apenas por resíduo de FCC sem se reflectir em alterações significativas nas outras propriedades.

Na Tabela 3.1 encontram-se sistematizadas as designações adoptadas para as argamassas preparadas com substituição parcial de cimento simultaneamente por resíduo de PN e por resíduo de catalisador exausto de FCC – moído e tal como recebido da refinaria de Sines – com, e sem, adição de superplastificante. Estas argamassas foram preparadas com substituições de 20%, 25% e 30% (Figura 3.1), em massa, de cimento por resíduos sendo que destes 60% eram resíduo de pedra natural e 40% resíduo de FCC.

Nesta campanha experimental, a determinação da resistência mecânica das argamassas com substituição parcial de cimento por dois resíduos, em simultâneo – resíduo de catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural – foi efectuada aos 2, 7 e 28 dias, como referido anteriormente no Capítulo 3.

Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores médios de consistência obtidos no ensaio de mesa de espalhamento das argamassas com incorporação de resíduo do catalisador exausto de FCC – tal como recebido da refinaria e moído – e com resíduo de PN, sem superplastificante. Apresenta-se também a variação do valor de espalhamento das argamassas com incorporação de resíduos em relação à argamassa de referência. Estes resultados estão representados na Figura 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento para as argamassas de referência e para as argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, sem introdução de superplastificante (SP).

Designação da argamassa	Ref.	C80_(rFCC,rPN)20	C75_(rFCC,rPN)25	C70_(rFCC,rPN)30
Espalhamento (mm)	195	173	180	160
Variação (%) <sup>1</sup>	0,0	-11,3	-7,7	-17,9
Designação da argamassa	Ref.	C80_(rFCCm,rPN)20	C75_(rFCCm,rPN)25	C70_(rFCCm,rPN)30
Espalhamento (mm)	195,0	195	180	185
Variação (%) <sup>1</sup>	0,0	0,0	-7,7	-5,1

<sup>1</sup> A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio da mesa de espalhamento para a argamassa de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:  $\left(\frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100\right) - 100$

Das análises da Tabela 4.4 e da Figura 4.4 observa-se que tipicamente as argamassas com incorporação de resíduos têm menor fluidez que a argamassa de referência e que a perda de fluidez é mais significativa quando o resíduo de catalisador exausto de FCC incorporado tem uma distribuição de tamanho de partícula maior. Estes resultados embora não estejam de acordo com o que se esperava – uma vez que o resíduo de catalisador moído apresenta maior área superficial específica e conseqüentemente, deveria absorver mais água e portanto, contribuir mais para a perda de fluidez – estão de acordo com os resultados apresentados na secção 4.1.1.2.

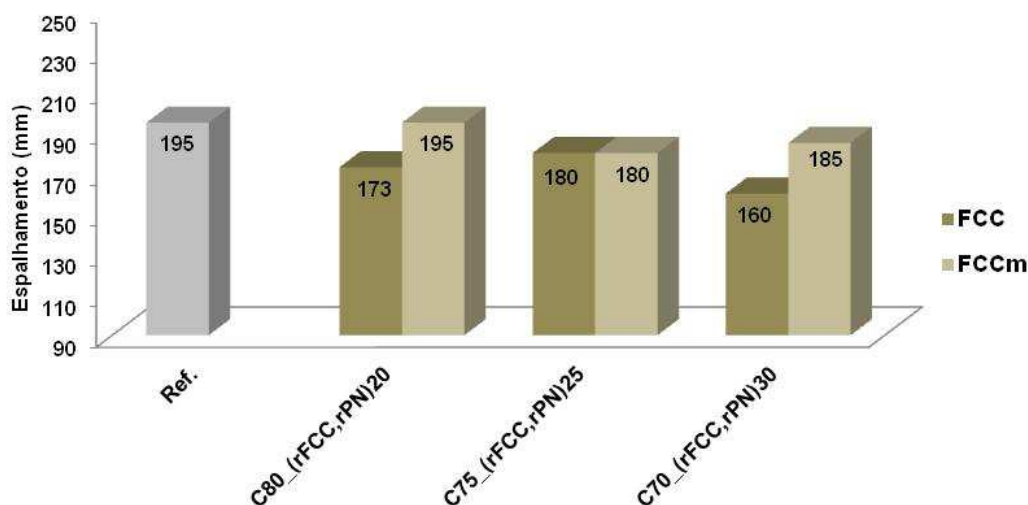


Figura 4.4 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento para as argamassas de referência e para as argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, sem introdução de superplastificante (SP).

Na Tabela 4.5 apresentam-se os valores médios de consistência obtidos no ensaio de mesa de espalhamento das argamassas de referência e das argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como recebido da refinaria e moído – e com resíduo de PN, com introdução de superplastificante, bem como a variação do valor de espalhamento das argamassas com incorporação de resíduos em relação à argamassa de referência. Estes resultados estão representados na Figura 4.5.

Analisando os valores de consistência – Tabela 4.5 e Figura 4.5 – para as argamassas com superplastificante e incorporação simultânea de resíduo de PN e de resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como recebido e moído – infere-se que a utilização de resíduo de catalisador exausto de FCC moído não influencia de modo significativo o valor da mesa de espalhamento e não é evidente a tendência de variação a que conduz uma vez que a incorporação de resíduo moído ora se traduz no aumento, na manutenção e na diminuição da fluidez da argamassa. Face ao exposto conclui-se que a compreensão da influência da moagem dos catalisadores exaustos de FCC nos resultados de consistência das argamassas carece de trabalho adicional em relação ao realizado no âmbito deste trabalho.

Tabela 4.5 – Resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, com introdução de superplastificante (SP)

Designação da argamassa	Ref_SP	C80_(rFCC,rPN)20_SP	C75_(rFCC,rPN)25_SP	C70_(rFCC,rPN)30_SP
Espalhamento (mm)	250	243	242	230
Varição (%) <sup>1</sup>	0,0	-2,8	-3,2	-8,0
Designação da argamassa	Ref_SP	C80_(rFCCm,rPN)20_SP	C75_(rFCCm,rPN)25_SP	C70_(rFCCm,rPN)30_SP
Espalhamento (mm)	250	233	250	230
Varição (%) <sup>1</sup>	0,0	-6,8	0,0	-8,0

<sup>1</sup> A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio de mesa de espalhamento para a argamassa de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:  $\left( \frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100 \right) - 100$

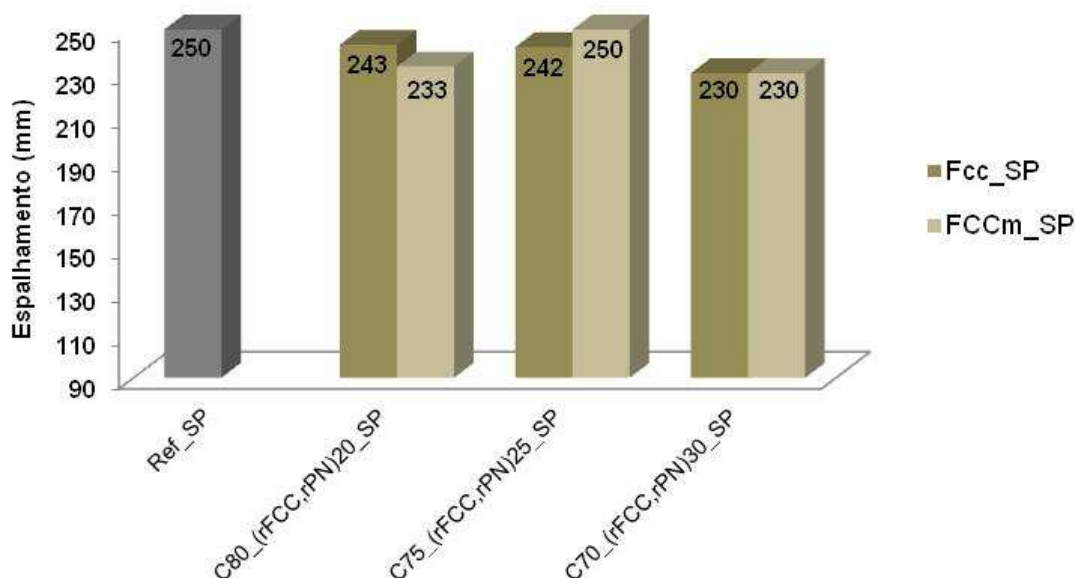


Figura 4.5 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento para as argamassas de referência e para as argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, com introdução de superplastificante (SP).

Tendo em conta que quando se substitui 25%, em massa, de cimento pelos dois resíduos – resíduo de FCC e resíduo de PN – e tendo em conta, como se disse atrás, que 60% dos resíduos são o resíduo de PN e 40% o catalisador exausto de FCC, então este cimento composto tem uma percentagem mássica correspondente a 10% de rFCC, como se pode verificar na Tabela 3.1. Na Figura 4.6, reproduzem-se valores já apresentados nas Figura 4.1 e Figura 4.5, para se fazer uma análise crítica comparativa dos resultados de consistência obtidos

com as argamassas nas quais 25% de cimento foi substituído simultaneamente pelos dois resíduos, C75\_(rFCC,rPN)25\_SP e C75(rFCCm,rPN)25\_SP, (com incorporação de rFCC tal como recebido da refinaria e moído, respectivamente) e – com a argamassa na qual 10% de cimento foi substituído por rFCC tal como recebido da refinaria. Na análise da Figura 4.6 constata-se que para a mesma percentagem mássica de resíduo de FCC incorporada as argamassas que também têm na sua constituição resíduo de PN têm maior fluidez. Será necessário avaliar o efeito da incorporação também de resíduo de PN nas outras propriedades particularmente na resistência mecânica das argamassas para avaliar com mais rigor as vantagens de incorporação simultânea dos dois resíduos, embora se revele, à partida, promissor quanto à minimização da necessidade de incorporação de SP.

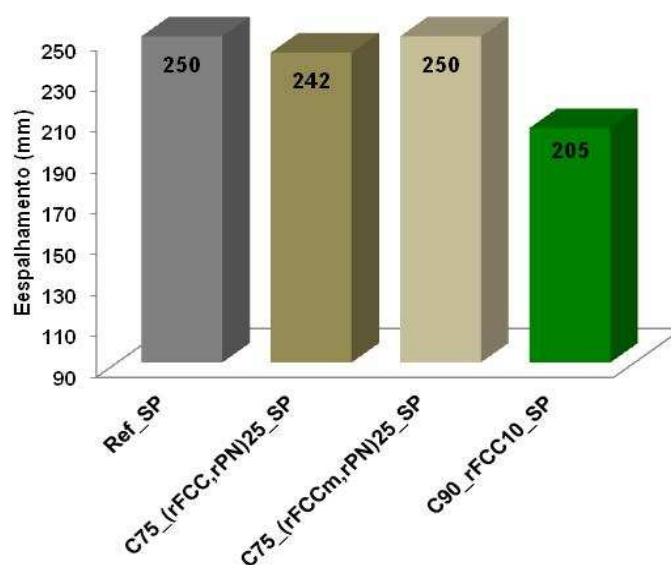


Figura 4.6 – Representação gráfica dos resultados de consistência (em milímetros) dos ensaios obtidos no ensaio de mesa de espalhamento (reproduzidos da Figura 4.1 e Figura 4.5), comparando resultados obtidos nos ensaios de mesa de espalhamento para as argamassas de referência, para as argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN e para as argamassas com 10% de substituição parcial de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP).

#### 4.1.2 MASSA VOLÚMICA

A determinação da massa volúmica, tal como todos os ensaios, foi efectuada em todas as argamassas preparadas (Tabela 3.1), de acordo com a norma EN 1015-6:1998[42]. Neste trabalho determinou-se a massa volúmica seguindo o protocolo sistematizado na Tabela 3.9, apresentado na secção 3.4.2.

As designações abreviadas de cada formulação estão descritas na Tabela 3.1.

#### 4.1.2.1 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC

Os valores médios da massa volúmica obtidos para cada formulação estudada estão apresentados na Tabela 4.6 e representados na Figura 4.7.

Note-se que, como na preparação das argamassas com incorporação de resíduo se adicionou superplastificante, a argamassa de referência com as quais devem ser comparadas é a que também tem superplastificante.

Tabela 4.6 – Resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição entre 5% e 30% de cimento por rFCC (tal como recebido da refinaria).

Designação da argamassa	Ref.	Ref_SP	C95_rFCC5_SP	C90_rFCC10_SP	C85_rFCC15_SP	C80_rFCC20_SP	C75_rFCC25_SP	C70_rFCC30_SP
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2200	2230	2230	2180	2160	2130	2080	1820

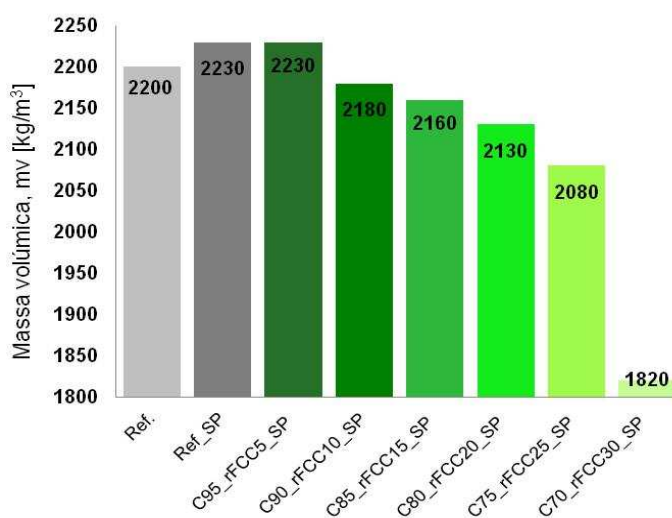


Figura 4.7 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC (tal como recebido da refinaria).

Da análise dos valores da Tabela 4.6 (representados na Figura 4.7) verifica-se que:

- A argamassa sem incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC mas com adição de superplastificante apresenta maior valor de massa volúmica;
- A substituição de 5%, em massa, cimento por de resíduo de catalisador exausto de FCC não se traduziu na alteração da massa volúmica da argamassa relativamente à argamassas sem incorporação de resíduo;

- Contudo, para teores de substituição entre 10 e 25%, em massa, de cimento por resíduo de FCC verifica-se a diminuição progressiva da massa volúmica das respectivas argamassas;
- A argamassa na qual 30% do cimento foi substituído por resíduo de FCC apresenta um valor de massa volúmica bastante mais baixo do que as restantes. Contudo, e como já foi referido atrás (secção 4.1.1.1) esta argamassa mesmo a olho nu não apresentava um aspecto homogéneo e coeso pelo que este valor pode não apresentar muito significado.

Comparando estes valores com os valores de consistência, verifica-se, a partir de 10% de substituição de cimento por resíduo, uma diminuição dos valores de massa volúmica, tal como também se verifica nos valores de consistência (ver Figura 4.1).

#### 4.1.2.2 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído

Como referido anteriormente, serão comparados os valores das massas volúmicas entre argamassas de referência, argamassas com substituição de 5% e 30% de cimento por rFCC tal como foi recebido da refinaria e argamassas com substituição de cimento por rFCC moído. Estes valores estão apresentados na Tabela 4.7 e representados na Figura 3.8. Os resultados da massa volúmica das argamassas com 30% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC deverão ser assumidos com precaução uma vez que as argamassas são pouco fluidas, pouco coesas e não homogéneas.

Tabela 4.7 – Resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído.

Designação da argamassa	Ref.	Ref_SP	C95_rFCCm5_SP	C70_rFCCm30_SP
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2200	2230	2210	2090

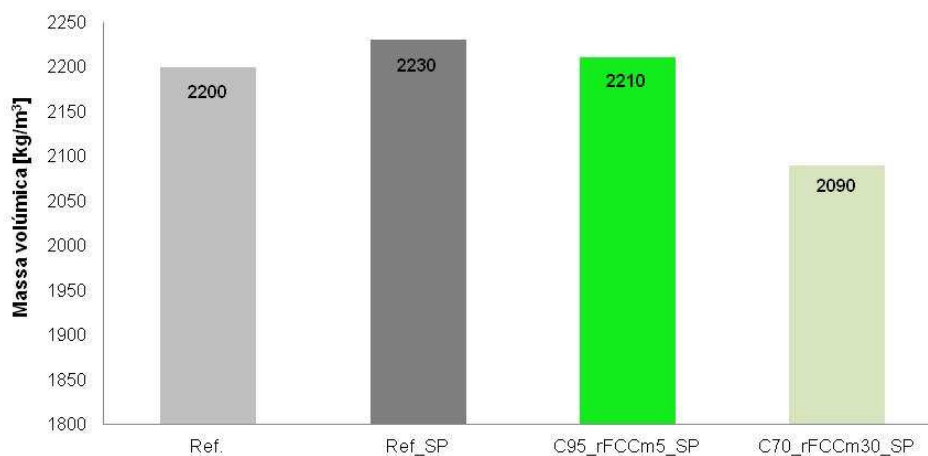


Figura 4.8 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído.

Da análise comparativa dos valores da Tabela 4.7 (representados na Figura 4.8) com os da Tabela 4.6 (representados na Figura 4.7) verifica-se que:

- A substituição de 5%, em massa, de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído, traduziu-se na diminuição da massa volúmica da argamassa relativamente à argamassas sem incorporação de resíduo (ao contrário do que se tinha verificado com o mesmo teor de incorporação de resíduo de FCC tal como chegou da refinaria -Figura 4.7)
- A substituição de 30%, em massa, de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído, traduziu-se na diminuição da massa volúmica da argamassa relativamente à argamassa sem incorporação de resíduo. No entanto, esta diminuição não foi tão acentuada como se verificou com o mesmo teor de incorporação de resíduo de FCC tal como chegou da refinaria (Figura 4.7).

Na Tabela 4.8 reproduzem-se, para facilidade de comparação, os resultados da massa volúmica (que se apresentaram anteriormente na Tabela 4.6 e na Tabela 4.7) da argamassa de referência com superplastificante e das argamassas com substituição parcial de cimento - 5% e 30% - por resíduo de FCC moído, bem como os valores de massa volúmica das argamassas as mesmas percentagens de substituição de cimento com o resíduo de FCC, tal como recebido da refinaria. Os valores da Tabela 4.8 encontram-se representados na Figura 4.9.

Tabela 4.8 – Resultados da massa volúmica (reproduzidos da Tabela 4.6 e da Tabela 4.7), comparando as argamassas com substituição parcial 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.

Designação da argamassa	Ref_SP	C95_rFCCm5_SP	C95_rFCC5_SP	C70_rFCCm30_SP	C70_rFCC30_SP
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2230	2210	2230	2090	1820

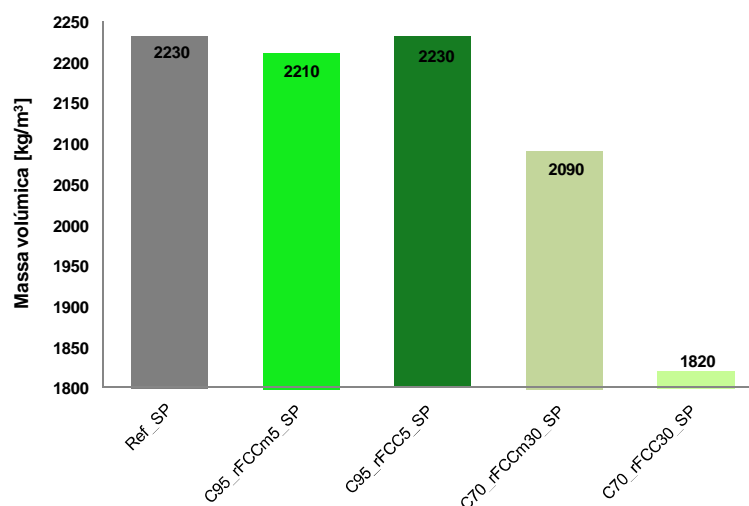


Figura 4.9 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica, comparando as argamassas com substituição de 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.

Da análise dos resultados da Tabela 4.8 (representados na Figura 4.9), verifica-se que:

- Argamassas com 5% de substituição de cimento por rFCCm apresentam menor valor de massa volúmica do que as argamassas com o mesmo teor de substituição mas incorporando rFCC tal como foi recebido da refinaria, contrariamente ao que acontece nos resultados de consistência, como se pode verificar na Figura 4.3.
- Entre argamassas com percentagens de substituição de cimento por rFCCm de 5% e 30%, as argamassas com substituição de 5% de rFCCm apresentam maior valor de massa volúmica, tal como se pode verificar nos resultados de consistência (Figura 4.3). No entanto, o valor correspondente às argamassas com 30% de substituição de cimento por resíduo de FCC devem ser assumidos com precaução, como já foi referido anteriormente, uma vez que estas argamassas são pouco fluidas, pouco coesas e não homogêneas.

#### 4.1.2.3 Argamassas com incorporação simultânea de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural

Na Tabela 4.9 e Figura 4.10 apresentam-se os valores da massa volúmica das argamassas com substituição parcial de cimento simultaneamente por dois resíduos: resíduo de PN e de FCC – tal como recebido da refinaria e moído – sem adição de superplastificante. Tal como se referiu anteriormente, estas argamassas foram preparadas com 20%, 25% e 30% (Figura 3.1), em massa, dos dois resíduos sendo que destes, 60% eram resíduo de pedra natural e 40% resíduo de catalisador exausto de FCC (Tabela 3.1).

Tabela 4.9 – Resultados de massa volúmica obtidos das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, sem adição de superplastificante (SP).

Designação da argamassa	Ref.	C80_(rFCC,rPN)20	C75_(rFCC,rPN)25	C70_(rFCC,rPN)30
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2200	2170	2080	2130
Designação da argamassa	Ref.	C80_(rFCCm,rPN)20	C75_(rFCCm,rPN)25	C70_(rFCCm,rPN)30
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2200	2160	2100	2120

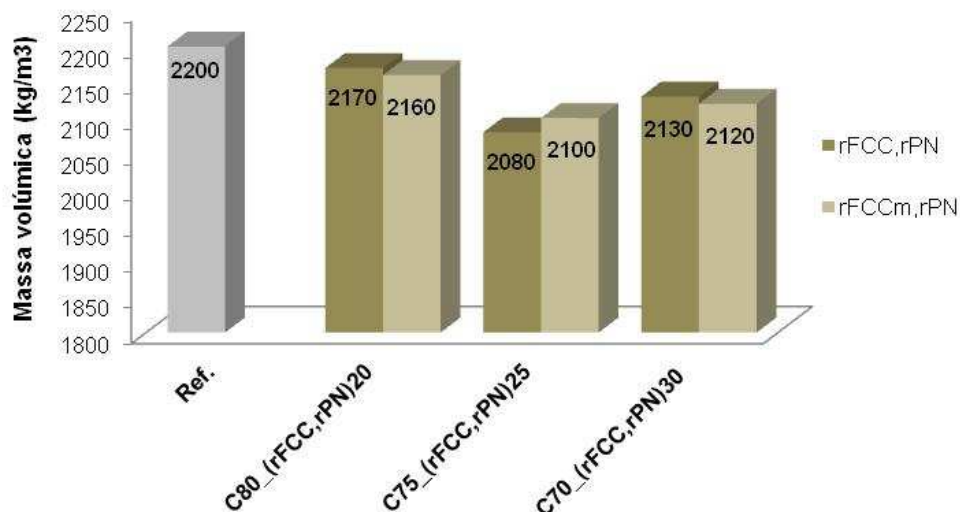


Figura 4.10 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, sem superplastificante (SP).

Na Tabela 4.10 apresentam-se os valores da massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento simultaneamente por dois resíduos: resíduo de pedra natural e resíduo de FCC – tal como recebido da refinaria e moído –, com adição de superplastificante. Estes valores estão representados na Figura 4.11.

Tabela 4.10 – Resultados de massa volúmica obtidos das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e rPN, com introdução de superplastificante (SP).

Designação da argamassa	Ref_SP	C80_(rFCC,rPN)20_SP	C75_(rFCC,rPN)25_SP	C70_(rFCC,rPN)30_SP
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2230	2230	2210	2190
Designação da argamassa	Ref_SP	C80_(rFCCm,rPN)20_SP	C75_(rFCCm,rPN)25_SP	C70_(rFCCm,rPN)30_SP
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )		2190	2210	2190

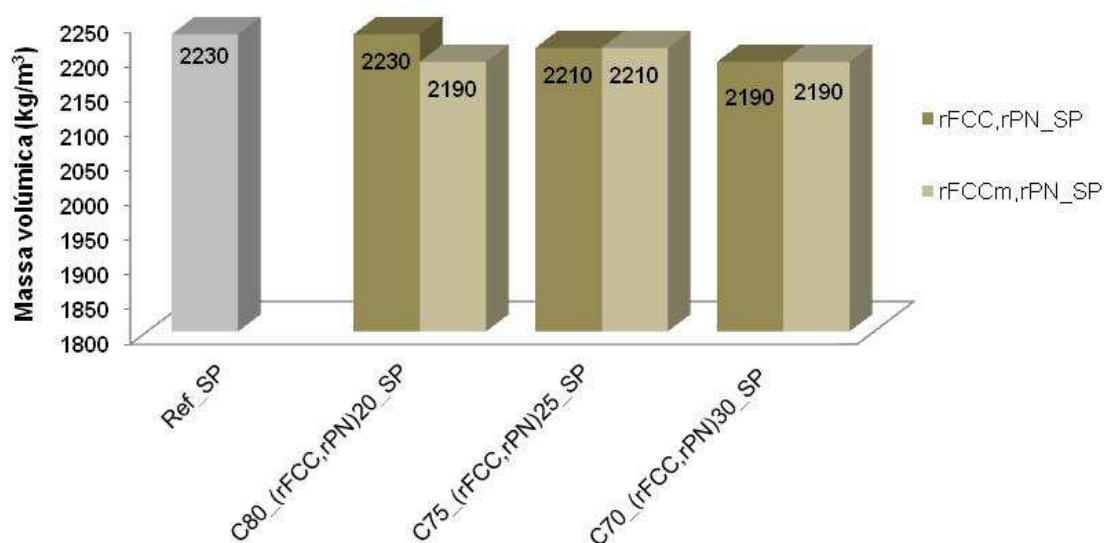


Figura 4.11 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, com superplastificante (SP).

Da análise dos valores das Tabela 4.9 e Tabela 4.10 (representados nas Figura 4.10 e Figura 4.11, respectivamente) verifica-se que o efeito da incorporação de catalisador exausto moído, relativamente à granulometria com que é recepcionado da refinaria, não é significativo e que a tendência de variação não é bem definida. Esta indefinição tinha já aliás sido constatada na influência da moagem nos resultados de espalhamento das argamassas com incorporação simultânea dos dois resíduos (Tabela 4.5 e Figura 4.5). Tal como se referiu anteriormente, o

cabal esclarecimento do efeito da moagem nas propriedades das argamassas exige a realização de trabalho adicional que se apresenta como perspectiva de trabalho futuro.

Tendo em conta que quando se substitui 25%, em massa, de cimento pelos dois resíduos – resíduo de FCC e resíduo de PN – e tendo em conta, como se disse atrás, que 60% dos resíduos são o resíduo de PN e 40% o catalisador exausto de FCC, então este cimento composto tem uma percentagem mássica correspondente a 10% de rFCC, como se pode verificar na Tabela 3.1. Na, Figura 4.12 reproduzem-se valores já apresentados na Figura 4.7 e Figura 4.11, para se fazer uma análise crítica comparativa dos resultados de massa volúmica obtidos com as argamassas nas quais 25% de cimento foi substituído simultaneamente pelos dois resíduos, C75\_(rFCC,rPN)25\_SP e C75(rFCCm,rPN)25\_SP, (com incorporação de rFCC tal como recebido da refinaria e moído, respectivamente) e – com a argamassa na qual 10% de cimento foi substituído por rFCC tal como recebido da refinaria. Na Figura 4.12 constata-se que para a mesma percentagem mássica de resíduo de FCC incorporada, as argamassas que também têm na sua constituição resíduo de PN têm maior massa volúmica.

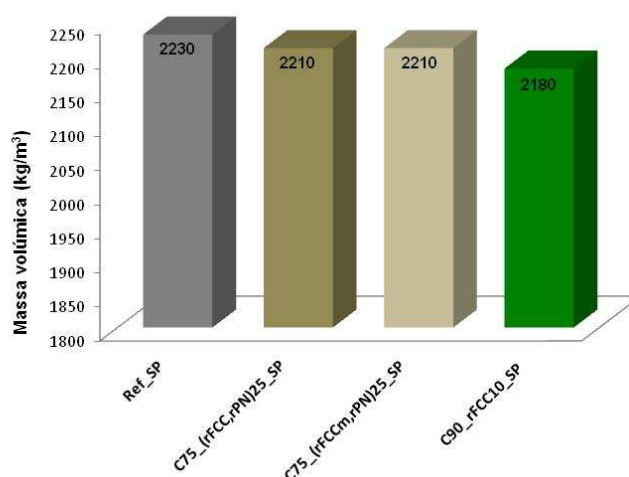


Figura 4.12 – Representação gráfica dos resultados de massa volúmica (reproduzidos da Tabela 4.10 e Tabela 4.6), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN e das argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP).

#### 4.1.3 TEOR EM AR

O ensaio de teor em ar das argamassas no estado fresco foi determinado de acordo com o procedimento experimental descrito na secção 3.4.3. O ensaio de teor em ar foi efectuado em todas as argamassas preparadas na campanha experimental (Tabela 3.1).

#### 4.1.3.1 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC

Na Tabela 4.11 e Figura 4.13 apresentam-se os valores médios do teor em ar das argamassas estudadas nas quais há substituição parcial de cimento por resíduo de FCC, bem como, a variação do teor de ar das argamassas com incorporação de resíduos em relação à argamassa de referência. Analisando estes resultados verifica-se que:

- Em argamassas com 5% de substituição de cimento o valor do teor em ar é menor do que o da argamassa de referência;
- O teor em ar aumenta até 15% de substituição de cimento por resíduo, diminuindo depois até 25% de substituição de cimento por resíduo, apresentando esta percentagem de substituição um valor de teor em ar semelhante ao valor de teor em ar da argamassa de referência;
- Em percentagens de 30% de substituição de cimento por resíduo o teor em ar aumentou substancialmente pelo que nem se representou esse valor na Tabela 4.11 uma vez que não tinha muito significado (como já foi referido atrás, estas argamassas são pouco fluidas, pouco coesas e não homogéneas)
- Até aos 15% de substituição, os resultados adquiridos experimentalmente confirmam o expectável, sendo que para um aumento do volume de vazios verifica-se uma diminuição da massa volúmica (Figura 4.7). Para teores de incorporação superiores verificou-se a continuação da diminuição da massa volúmica das argamassas mas não foi acompanhado pelo aumento do teor em ar, relativamente ao qual se verificou tendência de diminuição.

Tabela 4.11 – Resultados obtidos nos ensaios de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como recebido da refinaria).

Designação da argamassa	Ref.	Ref_SP	C95_ rFCC5 _SP	C90_ rFCC10 _SP	C85_ rFCC15 _SP	C80_ rFCC20 _SP	C75_ rFCC25 _SP
Teor em ar (%)	6,0	5,6	5,0	6,1	6,4	6,1	5,5
variação (%) <sup>1</sup>	0,0	0,0	-10,2	10,2	14,5	9,0	-1,3

<sup>1</sup> A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio de teor em ar da argamassa de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:  

$$\left( \frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100 \right) - 100$$

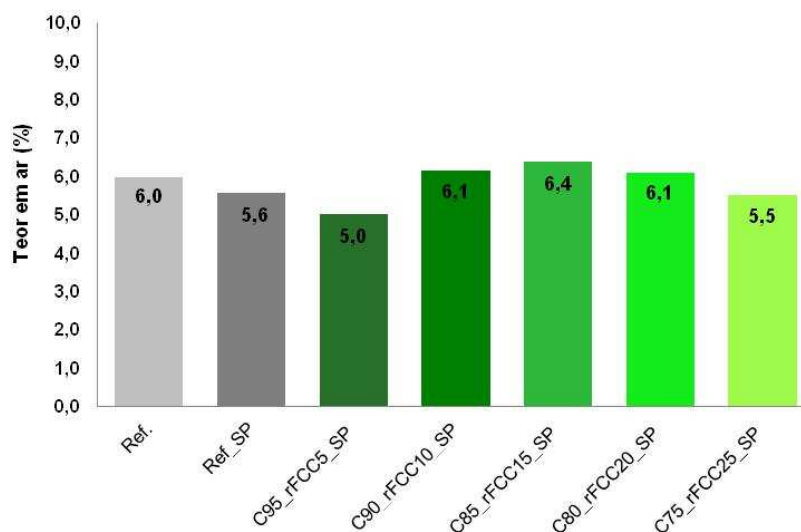


Figura 4.13 – Representação gráfica dos resultados de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como recebido da refinaria).

#### 4.1.3.2 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído

Na Tabela 4.12 encontram-se sistematizados os valores médios dos ensaios de teor em ar realizados, comparando das argamassas de referência e das argamassas com 5% e 30% de substituição parcial de cimento por resíduo moído de catalisador exausto FCC bem como, a variação do teor de ar das argamassas com incorporação de resíduos em relação à argamassa de referência. Os resultados do teor de ar destas argamassas estão representados na Figura 4.14.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de teor em ar obtidos no ensaio de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição de 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído, com superplastificante (SP).

Designação da argamassa	Ref_SP	C95_rFCCm5_SP	C70_rFCCm30_SP
Teor em ar (%)	5,6	5,3	7,4
Variação (%) <sup>1</sup>	0,0	-6,3	32,1

<sup>1</sup> A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio de teor em ar para a argamassa de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:  $\left(\frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100\right) - 100$

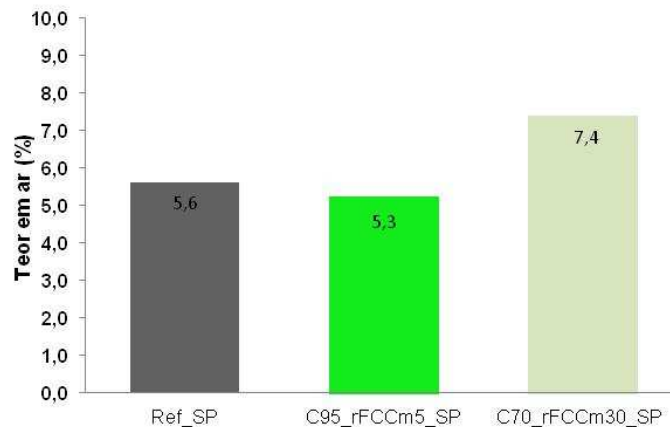


Figura 4.14 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de 5% e 30% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído

Analisando estes resultados verifica-se que:

- Quando se introduz resíduo de FCC moído em argamassas com 5% de substituição de cimento, o valor de teor em ar diminui relativamente à argamassa de referência;
- O valor de teor em ar em argamassas com 30% de substituição de cimento por rFCC moído aumenta bastante relativamente à argamassa de referência mas, como já foi referido anteriormente, este valor deverá ser assumido com precaução uma vez que as argamassas são pouco fluidas, pouco coesas e não homogêneas.

Na Tabela 4.13 reproduzem-se, para facilidade de comparação, os resultados de teor em ar (que se apresentaram anteriormente na Tabela 4.11 e na Tabela 4.12) obtidos nos ensaios de teor em ar para a argamassa de referência com superplastificante e para as argamassas com 5% de substituição parcial de cimento por resíduo de FCC moído, bem como os valores de teor em ar das argamassas com a mesma percentagem de substituição de cimento com o resíduo de FCC, tal como recebido da refinaria. É ainda apresentada a variação do teor de ar das argamassas com incorporação de resíduos em relação à argamassa de referência. Os valores da Tabela 4.13 encontram-se representados na Figura 4.15 (não se compararam as argamassas com incorporação de 30% de catalisador exausto com granulometria com que é recepcionado da fábrica e moído porque não se atribui muito significado aos valores obtidos para estas argamassas uma vez que as argamassas não eram coesas e homogêneas).

Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios de teor em ar (reproduzidos das Tabela 4.11 e Tabela 4.12), comparando as argamassas com substituição de 5% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.

Designação da argamassa	Ref_SP	C95_rFCC5_SP	C95_rFCCm5_SP
Teor em ar (%)	5,6	5,0	5,3
Varição (%) <sup>1</sup>	0,0	-10,7	-6,3

<sup>1</sup> A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio de teor em ar das argamassas de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:  $\left( \frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100 \right) - 100$

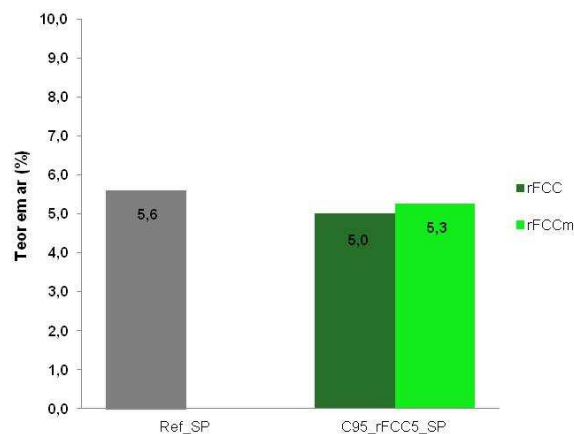


Figura 4.15 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de teor em ar, comparando as argamassas com substituição de 5% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como foi recebido e moído - com a argamassa de referência.

Tal como se verificou com os resultados do espalhamento (Figura 4.3) e da massa volúmica (Figura 4.9), o efeito da moagem do catalisador nos resultados de teor em ar não é conclusivo a partir do volume de ensaios realizados neste trabalho.

#### 4.1.3.3 Argamassas com incorporação simultânea de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural

Na Tabela 4.14 apresentam-se os valores médios do teor em ar para estas argamassas com resíduo de pedra natural e resíduo de catalisador exausto de FCC – tal como recebido da refinaria e moído – sem superplastificante, bem como, a variação do teor de ar das argamassas

com incorporação de resíduos em relação à argamassa de referência. Estes resultados estão representados na Figura 4.16.

Tabela 4.14 – Resultados do ensaio de teor em ar obtidos das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (rFCC) – tal como recebido da refinaria e moído – e resíduo de pedra natural (rPN), sem introdução de superplastificante (SP).

Designação da argamassa	Ref.	C80_(rFCC,rPN)20	C75_(rFCC,rPN)25	C70_(rFCC,rPN)30
Teor em ar (%)	6,0	7,2	9,0	6,7
Varição (%) <sup>1</sup>		20,4	50,5	12,0

Designação da argamassa	Ref.	C80_(rFCCm,rPN)20	C75_(rFCCm,rPN)25	C70_(rFCCm,rPN)30
Teor em ar (%)	6,0	8,0	7,6	8,4
Varição (%) <sup>1</sup>		33,8	27,1	40,5

<sup>1</sup> A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio de teor em ar da argamassa de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:

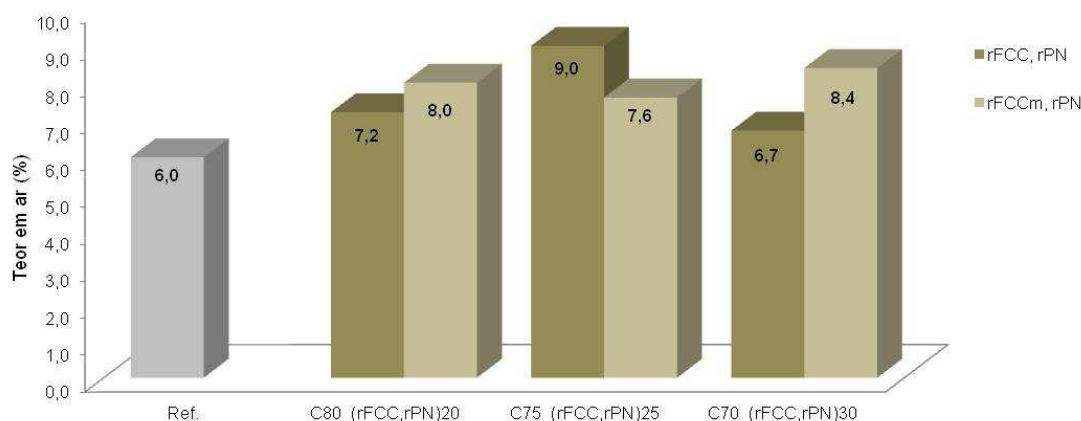
$$\left( \frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100 \right) - 100$$


Figura 4.16 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, sem superplastificante (SP).

Da análise dos valores incluídos na Tabela 4.14 (representados na Figura 4.16) verifica-se que:

- As argamassas com incorporação dos dois resíduos apresentam maior teor em ar do que as argamassas de referência.
- O facto de ser do FCC ser moído evidenciou efeitos diferentes consoante a percentagem de incorporação de resíduo. Tal como se tinha constatado atrás (subsecção 4.1.3.2), o volume de ensaios realizados com catalisador moído não é conclusivo em relação ao

efeito do efeito do tamanho das partículas de catalisador nos resultados de caracterização do estado fresco das argamassas preparadas;

- Resultados adquiridos experimentalmente confirmam o expectável, sendo que para um aumento do volume de vazios verifica-se uma diminuição da massa volúmica e vice-versa.

Na Tabela 4.15 apresentam-se os valores do teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com resíduo de pedra natural e de FCC – tal como recebido da refinaria e moído –, com adição de superplastificante. Apresenta-se também a variação do teor de ar das argamassas com incorporação de resíduos em relação à argamassa de referência. Estes valores encontram-se representados na Figura 4.17.

Tabela 4.15 – Resultados do ensaio de teor em ar obtidos das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (rFCC) – tal como recebido da refinaria e moído – e resíduo de pedra natural (rPN), com adição de superplastificante (SP).

Designação da argamassa	Ref_SP	C80_(rFCC,rPN)20_SP	C75_(rFCC,rPN)25_SP	C70_(rFCC,rPN)30_SP
Teor em ar (%)	5,6	4,7	4,3	5,8
Varição (%) <sup>1</sup>		-15,6	-22,8	4,1

Designação da argamassa	Ref_SP	C80_(rFCCm,rPN)20_S P	C75_(rFCCm,rPN)25_S P	C70_(rFCCm,rPN)30_S P
Teor em ar (%)	5,6	6,5	4,8	5,2
Varição (%) <sup>1</sup>		16,7	-13,8	-6,6

<sup>1</sup> A percentagem de variação é calculada relativamente ao resultado do ensaio de teor em ar da argamassa de referência com superplastificante recorrendo à seguinte expressão:  

$$\left( \frac{\text{Argamassa com substituição}}{\text{Argamassa de referência}} \times 100 \right) - 100$$

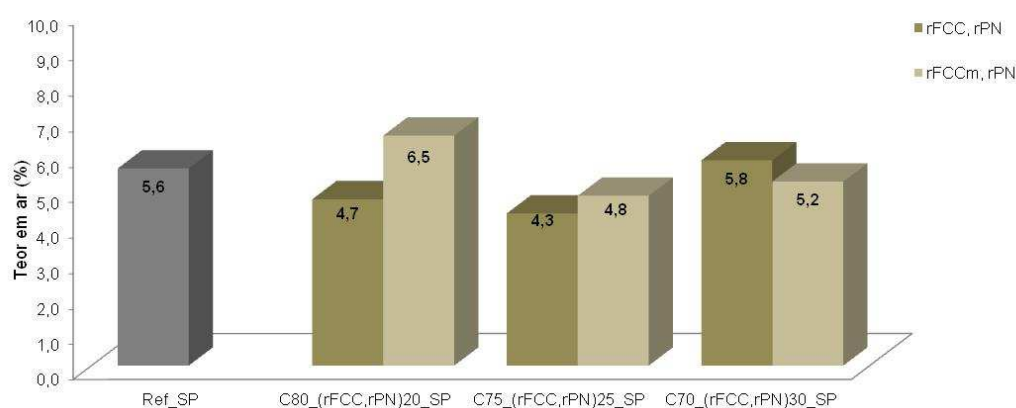


Figura 4.17 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de teor em ar das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC) – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, com superplastificante (SP).

Tendo em conta que quando se substitui 25%, em massa, de cimento pelos dois resíduos – resíduo de FCC e resíduo de PN – e tendo em conta, como se disse atrás, que 60% dos resíduos são o resíduo de PN e 40% o catalisador exausto de FCC, então este cimento composto tem uma percentagem mássica correspondente a 10% de rFCC, como se pode verificar na Tabela 3.1. Na, Figura 4.18 reproduzem-se valores já apresentados na Figura 4.13 e Figura 4.17 Figura 4.11, para se fazer uma análise crítica comparativa dos resultados de teor em ar obtidos com as argamassas nas quais 25% de cimento foi substituído simultaneamente pelos dois resíduos, C75\_(rFCC,rPN)25\_SP e C75(rFCCm,rPN)25\_SP, (com incorporação de rFCC tal como foi recebido da refinaria e moído, respectivamente) e – com a argamassa na qual 10% de cimento foi substituído por rFCC tal como recebido da refinaria. Na Figura 4.18 constata-se que para a mesma percentagem mássica de resíduo de FCC incorporada, as argamassas que também têm na sua constituição resíduo de PN têm maior teor em ar.

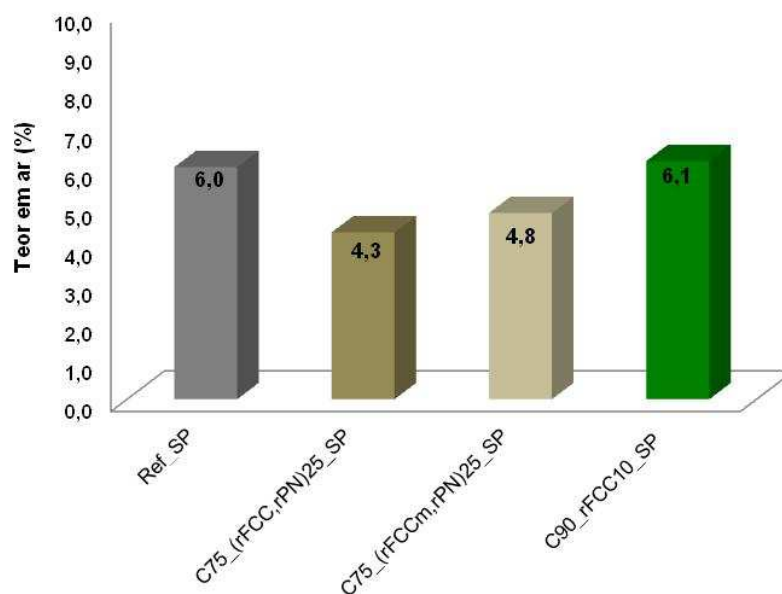


Figura 4.18 – Representação gráfica dos resultados de teor em ar (reproduzidos da Tabela 4.11 e Tabela 4.13, comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP).

Na análise da Figura 4.18 constata-se que para a mesma percentagem mássica de resíduo de catalisador exausto de FCC incorporada, as argamassas que também têm na sua constituição resíduo de PN têm maior teor em ar. Será necessário avaliar o efeito da incorporação também de resíduo de PN nas outras propriedades particularmente na resistência mecânica das argamassas para avaliar com mais rigor as vantagens de incorporação simultânea dos dois resíduos.

## 4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

---

Neste subcapítulo apresentam-se, analisam-se e discutem-se os resultados experimentais que se obtiveram nos ensaios das argamassas - com e sem incorporação de resíduos (Figura 3.1) - no estado endurecido que incluíram a determinação dos valores das resistências mecânicas, à flexão e à compressão, para diferentes tempos de hidratação. No que respeita às idades de ensaio, as argamassas de referência (sem incorporação de resíduo(s)) e com incorporação do resíduo de FCC (tal com recebido da refinaria de Sines e depois de moído) foram ensaiados aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias enquanto que as argamassas com substituição parcial de cimentos pelos dois resíduos – catalisador exausto de FCC e de pedra natural – foram ensaiados aos 2, 7 e 28 dias de hidratação.

Os protocolos experimentais adoptados para a preparação, moldagem e cura dos provetes bem como, de realização dos ensaios de resistência mecânica em si, encontram-se descritos nos Subcapítulos 3.3, 3.5 e 3.6.

Os valores de tensão de rotura à flexão e à compressão são calculados com base nas equações 3.2 e 3.3 (secção 3.7.1). Os valores médios da tensão de rotura à flexão foram obtidos com base em pelo menos 3 provetes de argamassa para cada idade da argamassa. Os valores da tensão de rotura à compressão apresentados correspondem à média dos valores obtidos nos meio-provetes que resultam dos provetes previamente ensaiados à flexão.

Tal como já foi referido anteriormente, foram realizados ensaios de resistência mecânica em argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC nos seguintes teores: 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% (percentagens mássicas). No entanto, as argamassas com 25% e 30% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC eram pouco coesas e pouco homogêneas pelo que se decidiu não apresentar os resultados dos ensaios à flexão e à compressão para estes teores de substituição.

Com o intuito de facilitar a análise crítica e a discussão dos resultados em relação ao efeito da incorporação dos resíduos em estudo nas propriedades mecânicas das argamassas preparadas, determinou-se para cada formulação um “índice de actividade” baseado no cálculo do índice de actividade pozolânica proposto pela norma americana ASTM C311 [47]. De acordo com esta norma o “índice de actividade pozolânica” determina-se como sendo a razão entre o valor da resistência à compressão da argamassa com 20% de adição de pozolana aos 28 dias de idade e o valor da resistência à compressão da argamassa de referência (sem incorporação de pozolana). Neste trabalho, considerou-se o “índice de actividade” (IA) como correspondendo à relação entre a resistência da argamassa produzida com uma dada percentagem de substituição de cimento por resíduo(s) com uma dada idade e a resistência da argamassa de referência (sem substituição de cimento por resíduo(s)) com a mesma idade, ou seja adoptou-se a seguinte expressão de cálculo:

$$\text{Índice de Actividade (IA)} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (4.2)$$

na qual:

A, é o valor médio da resistência mecânica (à flexão ou à compressão) da argamassa com uma dada percentagem de substituição de cimento por resíduo(s) e com uma dada idade;

B, é o valor médio da resistência mecânica (à flexão ou à compressão) da argamassa de referência, com a mesma idade.

#### 4.2.1 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O ensaio de resistência à flexão foi determinado de acordo com o procedimento experimental descrito na secção 3.7.1 e foi efectuado em todas as argamassas preparadas na campanha experimental (Tabela 3.1).

##### 4.2.1.1 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC

Na Tabela 4.16 encontram-se sistematizados os resultados dos ensaios de resistência à flexão realizados usando as argamassas de referência e as argamassas com substituição parcial, de 5%, 10%, 15% e 20%, de cimento por resíduo de FCC, tal como foi recebido da refinaria de Sines. Além destas percentagens de substituição de cimento por resíduo de FCC, também foram realizados ensaios para 25% e 30% de substituição. No entanto, face à falta de homogeneidade e coesão das argamassas obtidas com estas percentagens de substituição, estas tornam-se friáveis, o que se reflecte numa dispersão muito elevada nos valores de resistência, aos quais não pode ser atribuído significado físico.

Note-se que, como na preparação das argamassas com incorporação de resíduo se adicionou superplastificante, a argamassa de referência com a qual devem ser comparadas é a que também tem superplastificante.

Os valores da resistência à flexão obtidos neste estudo para as argamassas referidas anteriormente estão expostos na Tabela 4.16 e representados na Figura 4.19.

Tabela 4.16 – Resultados de resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de 5, 10, 15 e 20% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria de Sines).

Idade dos provetes (dias)	Designação da argamassa					
	Ref.	Ref_SP	C95_rFCC5_SP	C90_rFCC10_SP	C85_rFCC15_SP	C80_rFCC20_SP
2	7,1	9,1	8,2	7,2	6,5	4,2
7	8,9	10,8	9,6	9,0	8,2	7,0
28	9,8	11,3	11,2	9,8	9,1	8,1
56	11,3	12,0	11,6	11,3	9,1	9,2
90	11,6	12,1	11,4	11,1	9,8	8,0

Na Tabela 4.17 apresenta-se o Índice de Actividade (IA) determinado recorrendo à expressão (4.1).

Tabela 4.17 – Valores obtidos para o Índice de Actividade – IA – relativos à resistência à flexão das argamassas com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria de Sines).

Idade dos provetes (dias)	Designação das argamassas				
	Ref_SP	C95_rFCC5_SP	C90_rFCC10_SP	C85_rFCC15_SP	C80_rFCC20_SP
2	100,0	90,5	80,0	72,0	46,1
7	100,0	88,4	83,3	76,0	65,0
28	100,0	98,9	86,7	80,7	71,5
56	100,0	96,1	93,8	75,8	76,6
90	100,0	94,2	91,3	81,0	65,8

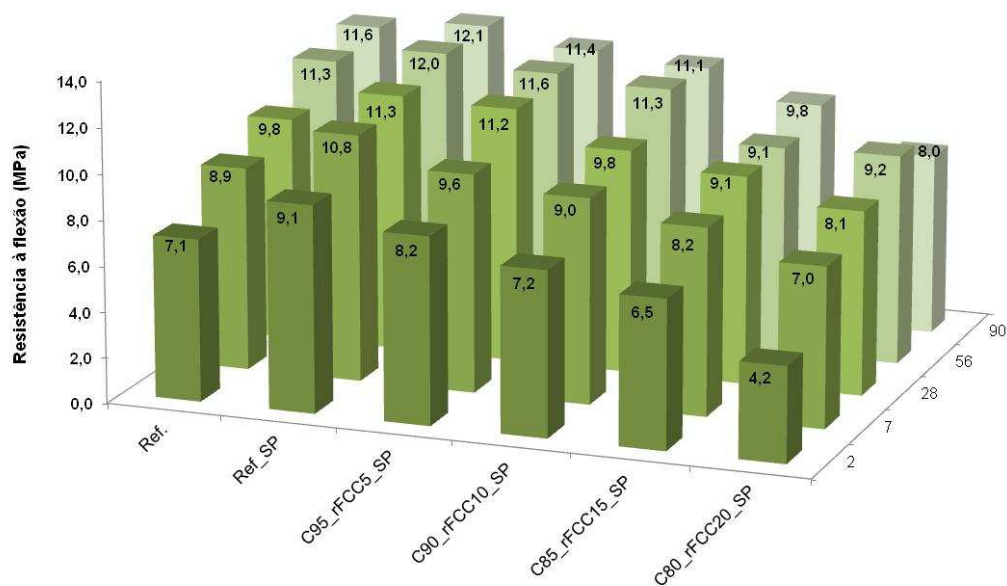


Figura 4.19 – Representação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas com 5%, 10%, 15%, e 20% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias de hidratação.

Da análise da Tabela 4.16, Tabela 4.17 e Figura 4.19, observa-se que:

- A resistência à flexão da argamassa de referência com adição de superplastificante é superior à da argamassa de referência sem adição de superplastificante, independentemente do tempo de hidratação, como se estava à espera;
- À medida que aumenta a percentagem de substituição de cimento por resíduo de FCC tal como recebido, diminui a resistência à flexão independentemente do tempo de hidratação
- Até aos 90 dias de idade verifica-se que nenhum dos valores de resistência à flexão das argamassas com substituição de cimento por FCC atinge o valor da resistência da argamassa de referência.

#### 4.2.1.2 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído

Na Tabela 4.18, e Figura 4.20, estão representados os valores obtidos para as resistências à flexão da argamassa de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído. Também se efectuaram argamassas com 30% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído mas, como acontecia com as argamassas com 30% de

substituição de cimento por resíduo de FCC tal como foi recebido da refinaria, não se apresentam estes valores nesta secção por não se poder atribuir significado devido à dispersão dos resultados obtidos.

Embora com uma diferença pouco significativa, observa-se que os valores das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído são ligeiramente superiores aos da argamassa de referência. Não obstante, este resultado é um resultado preliminar pelo que seria importante fazer um estudo mais completo com o resíduo de FCC moído.

Tabela 4.18 – Valores obtidos para a resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído.

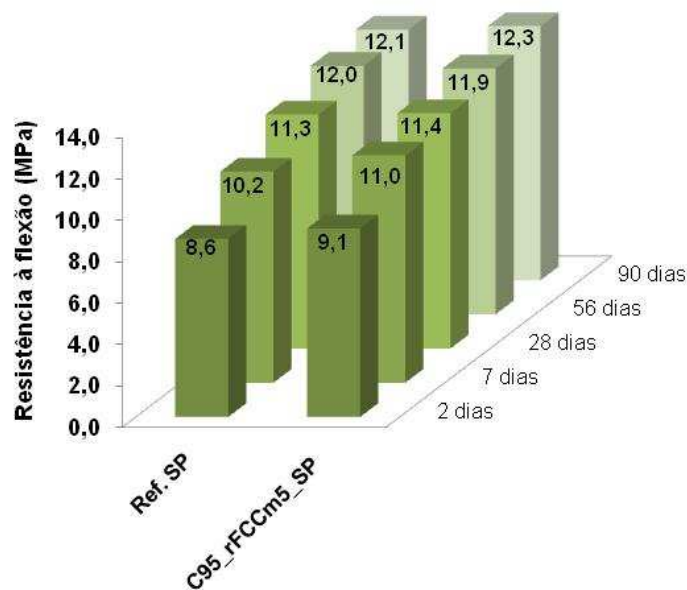


Figura 4.20 – Valores obtidos da resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído (rFCCm).

Na Figura 4.21 reproduzem-se, para facilidade de comparação, os resultados dos ensaios de resistência à flexão obtidos com a argamassa de referência, com os valores das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC tal como foi recebido da refinaria e

resíduo de FCC moído (que se apresentaram anteriormente na Tabela 4.16 e na Tabela 4.18, respectivamente).

Observa-se na Figura 4.21 que a introdução de resíduo de FCC moído aumenta ligeiramente a resistência à flexão.

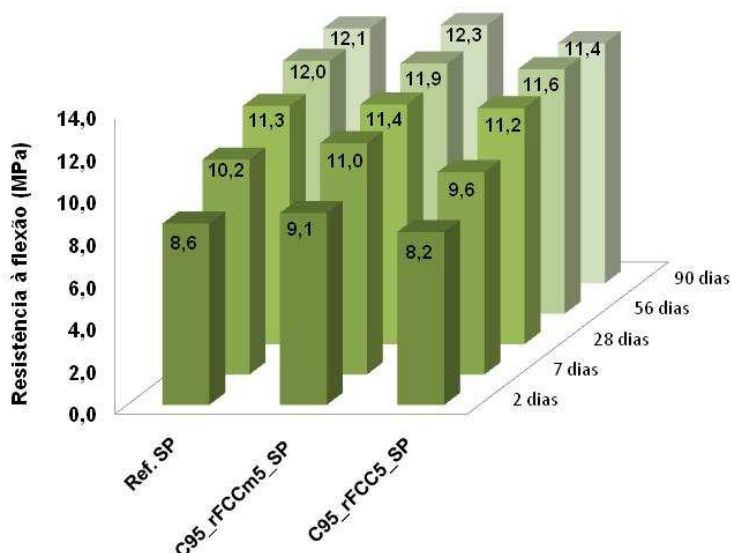


Figura 4.21 – Reprodução dos resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído (rFCCm) e 5% de substituição de cimento por resíduo tal como foi recebido da refinaria (rFCC).

#### 4.2.1.3 Argamassas com incorporação simultânea de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural

Na campanha experimental realizada no âmbito do presente trabalho prepararam-se argamassas com incorporação dos dois resíduos: do catalisador exausto de FCC e do resíduo de PN, tendo como principal motivação avaliar se - da sinergia da presença simultânea dos dois resíduos - pode haver diminuição da quantidade de superplastificante que se tem que utilizar nos cimentos que são parcialmente substituídos apenas por resíduo de FCC, sem se reflectir em alterações significativas nas outras propriedades.

Nesta secção apresentam-se os resultados da resistência mecânica à flexão - aos 2, 7 e 28 dias de hidratação - das argamassas, preparadas com e sem superplastificante, com substituição parcial de cimento em simultâneo por dois resíduos: resíduo de catalisador exausto de FCC.

Na Tabela 4.19, e Figura 4.22, estão representados os valores médios da resistência à flexão das argamassas de referência, com e sem adição de superplastificante, bem como das argamassas com substituição parcial de cimento em simultâneo pelos dois resíduos: resíduo de FCC e resíduo de PN (recorrendo à notação apresentada na Tabela 3.1) também com, e sem, adição de superplastificante.

Tabela 4.19 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão (MPa) para as argamassas com substituição de cimento por resíduo de FCC e de PN.

% substituição de cimento por resíduos	Designação da argamassa	Idade dos provetes (dias)		
		2	7	28
	Ref.	7,1	8,9	9,8
	Ref_SP	9,1	10,8	11,3
20%	rFCC,rPN	4,3	7,0	10,0
	rFCCm,rPN	5,2	8,0	10,0
	rFCC, rPN_SP	9,1	10,0	12,0
	rFCCm,rPN_SP	6,9	10,0	12,3
25%	rFCC,rPN	2,7	5,9	7,7
	rFCCm,rPN	3,6	7,6	8,6
	rFCC, rPN_SP	6,7	9,2	10,7
	rFCCm,rPN_SP	6,8	10,6	12,4
30%	rFCC,rPN	3,4	6,5	8,0
	rFCCm,rPN	3,4	6,6	8,9
	rFCC, rPN_SP	5,1	8,2	9,9
	rFCCm,rPN_SP	6,0	9,5	12,7

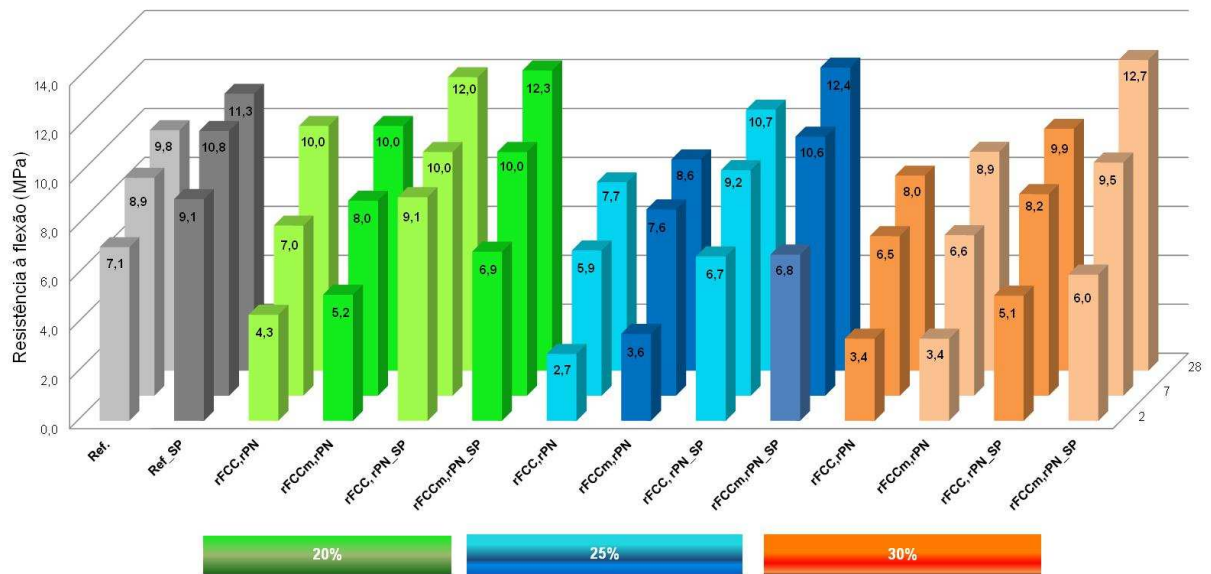


Figura 4.22 – Representação gráfica dos valores da resistência à flexão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de 20%, 25% e 30% de cimento por rFCC (moído e tal como foi recebido da refinaria) e rPN, com e sem adição de SP.

Na Tabela 4.20 e na Tabela 4.21 apresenta-se o Índice de Actividade (IA) recorrendo à expressão 4.1.

Tabela 4.20 – Índice de actividade da resistência à flexão das argamassas com substituição parcial de cimento simultaneamente por resíduo de catalisador exausto de FCC e por resíduo de pedra natural, sem adição de superplastificante.

Idade dos provetes (dias)	Designação da argamassa						
	Ref.	C80_ (rFCC,rPN)20	C80_ (rFCCm,rPN)20	C75_ (rFCC,rPN)25	C75_ (rFCCm,rPN)25	C70_ (rFCC,rPN)30	C70_ (rFCCm,rPN)30
2	100,0	61,1	72,7	38,5	50,1	47,3	47,3
7	100,0	78,1	89,5	66,7	85,5	73,2	73,7
28	100,0	101,8	101,8	78,3	87,9	81,1	91,1

Tabela 4.21 – Índice de actividade da resistência à flexão das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e de pedra natural, com adição de superplastificante.

Idade dos provetes	Designação da argamassa						
	Ref_SP	C80_ (rFCC,rPN)20 _SP	C80_ (rFCCm,rPN)20 _SP	C75_ (rFCC,rPN)25 _SP	C75_ (rFCCm,rPN)25 _SP	C70_ (rFCC,rPN)30 _SP	C70_ (rFCCm,rPN)30 _SP
2	100,0	100,9	76,3	74,1	75,0	56,5	65,9
7	100,0	92,1	92,1	85,2	97,8	76,2	88,1
28	100,0	106,0	108,4	94,2	109,4	87,3	112,2

Como se pode observar na Tabela 4.19 e Tabela 4.20 em argamassas com substituição de resíduo de catalisador exausto de FCC e de pedra natural (sem introdução de superplastificante) verifica-se que:

- Aos 2 e 7 dias de cura, nenhuma das argamassas alcança um valor de resistência à flexão igual ao da argamassa de referência;
- Aos 28 dias de cura, apenas as resistências à flexão das argamassas com 20% de substituição de cimento por resíduos superam os valores das resistências à flexão argamassa de referência.

Quando se introduz superplastificante nestas argamassas – Tabela 4.19 e Tabela 4.21 – verifica-se que:

- Aos 2 e 7 dias as argamassas com substituição não atingem o valor da resistência à flexão das argamassas de referência;

- Aos 28 dias, as argamassas com 20% substituição parcial simultânea de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria e moído) e por resíduo de PN, apresentam uma resistência à flexão superior à argamassa de referência;
- Aos 28 dias, as argamassas com percentagens de substituição de cimento de 20%, 25% e 30% por rFCC moídos e rPN superam a argamassa de referência;
- Aos 28 dias, as argamassas com adição de superplastificante e introdução de rFCC moído (i) apresentam resistência à flexão superior ao das argamassas com incorporação dos dois resíduos mas em que o catalisador exausto não foi moído e (ii) o valor da resistência, aumenta à medida que aumenta a percentagem de substituição do cimento.

Na Tabela 4.22 e Figura 4.23 encontram-se reproduzidos os valores da resistência à flexão das argamassas com substituição de cimento por resíduo de pedra natural e por resíduo de FCC (moído e tal como foi recebido da refinaria de Sines) e da argamassa com 10% de substituição de cimento por resíduo de FCC. Fez-se esta análise porque, como foi referido anteriormente, a 25% de substituição de cimento por resíduo de FCC e por resíduo de PN corresponde uma substituição de 10% de cimento por resíduo de FCC (Tabela 3.1). Analisando os dados pode-se verificar que:

- Comparando o resultado de resistência à flexão da argamassa com incorporação simultânea dos resíduos de FCC e de PN com o resultado da argamassa com incorporação simultânea também dos dois resíduos mas em que o resíduo de FCC foi moído, verifica-se que a introdução de FCC moído se traduz num aumento da resistência à flexão para as três idades analisadas, chegando mesmo a superar os valores da resistência à flexão da argamassa de referência.
- A argamassa com incorporação simultânea dos resíduos de FCC e de PN, e na qual o teor de resíduo de FCC corresponde a 10% (em massa) de ligante, apresenta menor resistência à flexão do que a argamassa com 10% de substituição de cimento apenas por resíduo de FCC aos 2 dias de hidratação e maior resistência à flexão aos 7 e 28 dias. Estes resultados estão de acordo com o que seria de esperar com base nos resultados da mesa de espalhamento (Figura 4.6);

Tabela 4.22 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão (MPa) (reproduzidos da Tabela 4.16 e da Tabela 4.19), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP).

Idade dos provetes (dias)	Designação da argamassa			
	Ref_SP	C75_ (rFCC,rPN)25 _SP	C75_ (rFCCm,rPN)25 _SP	C90_ rFCC10 _SP
2	9,1	6,7	6,8	7,2
7	10,8	9,2	10,6	9,0
28	11,3	10,7	12,4	9,8

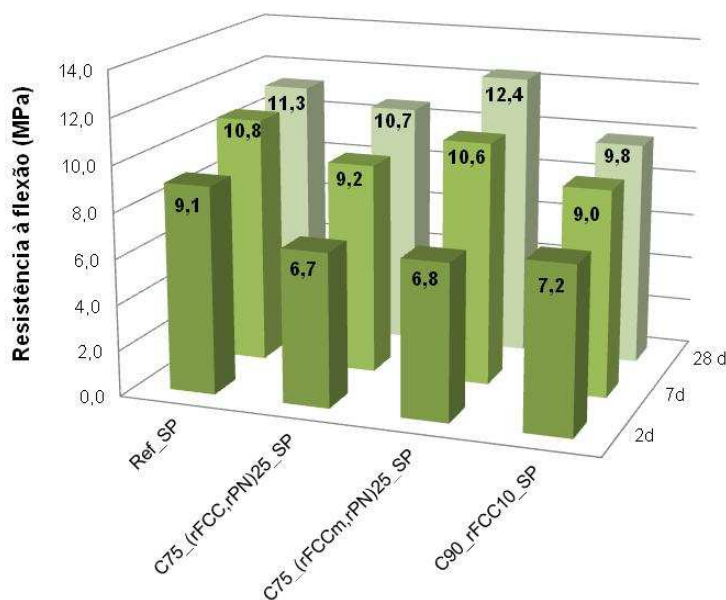


Figura 4.23 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão (reproduzidos da Tabela 4.22), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP).

#### 4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tal como foi referido no início deste Subcapítulo e na secção 3.7.1, todos os meio-provetes obtidos dos ensaios à flexão foram sujeitos ao ensaio de resistência à compressão.

#### 4.2.2.1 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC

Na Tabela 4.23 encontram-se sistematizados os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados usando as argamassas de referência e as argamassas com substituição parcial, entre 5, 10 15 e 20%, de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC, tal como foi recebido da refinaria de Sines. Além destas percentagens de substituição de cimento por resíduo de FCC, também foram realizados ensaios para 25% e 30% de substituição. No entanto, face à falta de homogeneidade e coesão das argamassas obtidas com estas percentagens de substituição, estas tornam-se friáveis, o que se reflecte numa dispersão muito elevada nos valores de resistência, aos quais não pode ser atribuído significado físico. Consequentemente, e não serão apresentados os resultados da resistência à compressão das argamassas com estas percentagens de incorporação de catalisador exausto de FCC (como se fez em relação aos resultados dos ensaios de resistência à flexão).

Note-se que, como na preparação das argamassas com incorporação de resíduo se adicionou superplastificante, a argamassa de referência com as quais devem ser comparadas é a que também tem superplastificante.

Os valores obtidos neste estudo para as argamassas referidas anteriormente estão expostos na Tabela 4.23 e representados na Figura 4.24.

Tabela 4.23 – Resultados de resistência à compressão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com substituição parcial de 5, 10, 15 e 20% de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria de Sines).

Idade dos provetes (dias)	Designação da argamassa					
	Ref.	Ref_SP	C95_rFCC5_SP	C90_rFCC10_SP	C85_rFCC15_SP	C80_rFCC20_SP
2	27,1	35,7	33,4	30,8	26,5	17,9
7	36,5	46,5	46,5	46,8	42,0	34,5
28	45,5	53,3	54,8	56,2	52,3	47,9
56	47,9	57,3	59,2	57,7	55,1	51,3
90	50,7	60,1	60,8	62,1	60,8	51,9

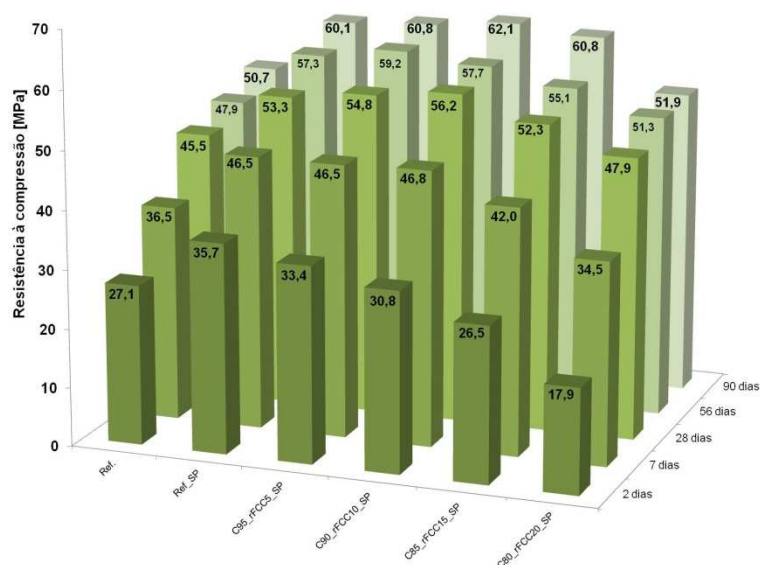


Figura 4.24 – Representação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias de hidratação.

Na Tabela 4.24 está determinado o Índice de actividade (IA) que, como foi referido na secção 4.2, relaciona a argamassa em análise com a argamassa de referência.

Tabela 4.24 – Valores obtidos para o Índice de Actividade – IA – relativos à resistência à compressão das argamassas de com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria de Sines).

Idade dos provetes (dias)	Designação das argamassas				
	Ref. SP	C95_rFCC5_SP	C90_rFCC10_SP	C85_rFCC15_SP	C80_rFCC20_SP
2	100,0	93,5	86,2	74,3	50,1
7	100,0	99,9	100,7	90,4	74,2
28	100,0	102,9	105,5	98,2	90,0
56	100,0	103,3	100,7	96,2	89,5
90	100,0	101,2	103,3	101,1	86,3

Da análise dos valores que se apresentam na Tabela 4.23, (representados na Figura 4.24) e na Tabela 4.24 e observa-se que:

- Aos 2 dias de idade os valores da resistência à compressão dos provetes das argamassas com substituição de ligante por FCC (com adição de SP) são inferiores aos da argamassa de referência (com adição de SP) e diminui com o aumento do teor de resíduo incorporado;
- Aos 7 dias de idade verifica-se que para 5% de substituição de cimento por FCC (com adição de SP) os valores da resistência à compressão destes provetes já são iguais às da argamassa de referência, e com 10% de substituição de cimento por resíduo de FCC já superam os valores da resistência à compressão da argamassa de referência. Para percentagens de substituição superiores, os valores de resistência à compressão são inferiores aos da argamassa de referência (com adição de SP);
- Aos 28 dias de idade verifica-se que os valores de resistência à compressão das argamassas com substituição de cimento por FCC até 10% são superiores ao valor da resistência da argamassa de referência;
- Aos 56 de idade os valores da resistência das argamassas com substituição parcial de cimento por FCC até 10% ainda são superiores à resistência da argamassa de referência mas a diferença não é tão significativa, como se pode observar na Tabela 4.24;
- Aos 90 dias de idade, os valores da resistência à compressão dos provetes das argamassas com substituição de 5, 10 e 15% continuam a superar os valores da resistência à compressão dos provetes da argamassa de referência.

A substituição de cimento por outro material deveria traduzir-se na diminuição da resistência à compressão das argamassas devido ao efeito diluição provocado pela substituição de parte do cimento. Este efeito pode ser minimizado pelo efeito de *filler* que se verifica se o tamanho de partícula dos materiais substitutos for menor que o das partículas de cimento ou devido à reacção pozolânica com o hidróxido de cálcio (CH), originando mais C-H-S ao sistema cimentício (Secção 2.2.2) [48] [49]. No caso deste trabalho, o efeito de *filler* deve ser desprezável porque as partículas do resíduo de catalisador exausto de FCC têm dimensão superior às do cimento [50]. Consequentemente, nas argamassas com incorporação de resíduo cujo módulo da diferença dos valores de resistência à compressão, em relação à da argamassa de referência, sejam menores que percentagem de incorporação de resíduo pode assumir-se a existência de actividade pozolânica. Seguindo este princípio verifica-se actividade pozolânica para todas as argamassas preparadas com incorporação de resíduo catalítico de FCC a partir dos 7 dias de hidratação, inclusive pelo que se podem considerar detentores de actividade pozolânica significativa.

Como foi referido anteriormente, de acordo com o Quadro 2 da norma NP EN 197-1:2001[6], um cimento para ser comercializado com a marca CE (e poder ser comercializado no espaço europeu) tem de obedecer a requisitos mínimos de resistência à compressão aos 2, 7 e 28 dias. Comparando os valores deste quadro e da Tabela 4.23 (e Figura 4.24) verifica-se que, as argamassas com 5%, 10% e 15% de substituição de cimento por resíduo de FCC estão conforme a norma NP EN 197-1:2001 para serem classificados como um cimento de classe de

resistência 42,5R uma vez que aos dois dias de idade apresentam valores de resistência à compressão superiores a 20,0 MPa e aos 28 dias de idade apresentam valores de resistência à compressão superiores a 42,5 MPa.

#### 4.2.2.2 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moído

Na Tabela 4.25, e na Figura 4.25, estão representados os valores obtidos para as resistências à compressão da argamassa de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído. Embora com uma diferença pouco significativa, observa-se que os valores das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC são ligeiramente superiores aos da argamassa de referência, sendo sempre superiores aos requisitos mecânicos mínimos exigidos na norma NP EN 197-1:2001 [6].

Tabela 4.25 – Valores obtidos para a resistência à compressão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído.

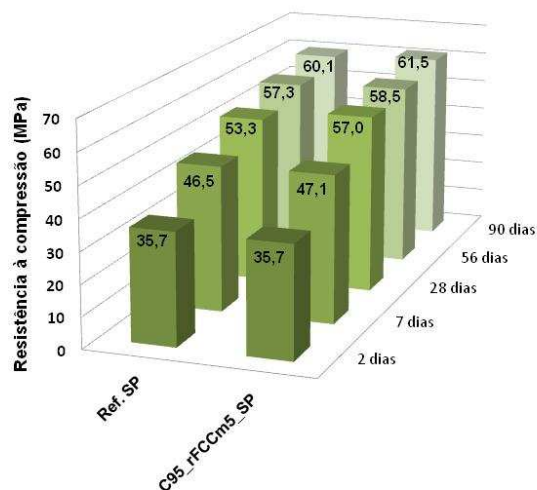
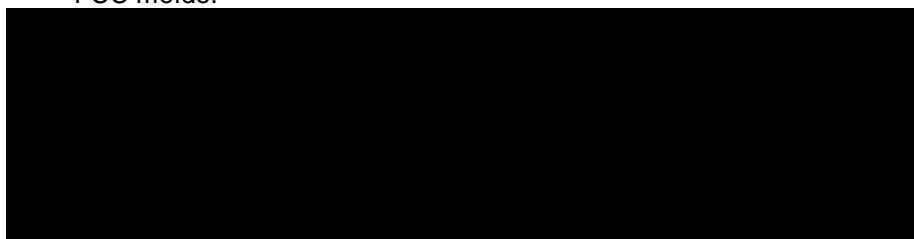


Figura 4.25 – Representação gráfica dos valores obtidos da resistência à compressão (MPa) das argamassas de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC moído (rFCCm).

Na Figura 4.26 reproduzem-se, para facilidade de comparação, os resultados dos ensaios de resistência à compressão obtidos com a argamassa de referência, com os valores das argamassas com 5% de substituição de cimento por resíduo de FCC tal como foi recebido da refinaria e com resíduo de FCC moído (que se apresentaram anteriormente na Tabela 4.23 e na Tabela 4.25, respectivamente).

Observa-se na Figura 4.26 que a introdução de resíduo de FCC moído aumenta ligeiramente a resistência à compressão. Resultados com este foram verificados por outros autores e são expectáveis porque a actividade pozolânica do catalisador exausto de FCC deve-se à combinação dos seus constituintes activos e à dimensão sua superfície específica disponível para que a reacção ocorra [22]. Por esta razão valores de resistência à compressão são superiores em argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC moídos relativamente às argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC tal como foi recebido da refinaria de Sines vão ao encontro do que se esperaria. Adicionalmente pode haver um contributo do efeito de *filler*. Contudo, o número de ensaios realizados, neste trabalho, com partículas de FCC moídas não é significativo para ser conclusivo.

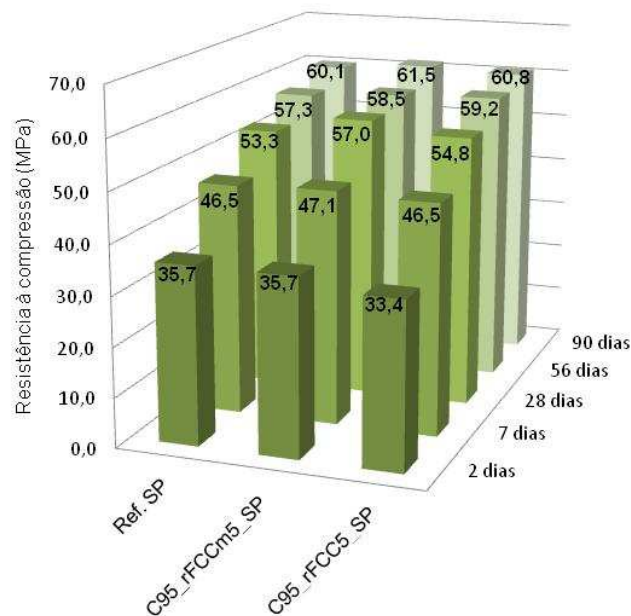


Figura 4.26 – Reprodução dos resultados experimentais da resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas com 5% de substituição de cimento por rFCC moído e tal como foi recebido da refinaria

#### 4.2.2.3 Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC e de resíduo de pedra natural

Nesta secção apresentam-se os resultados da determinação da resistência mecânica à compressão das argamassas com substituição parcial de cimento em simultâneo por dois resíduos: resíduo de catalisador exausto de FCC e resíduo de pedra natural aos 2, 7 e 28 dias, como referido anteriormente no Capítulo 3.

Na Tabela 4.26 e Figura 4.27 estão representados os valores médios da resistência à compressão das argamassas de referência, com e sem adição de superplastificante, bem como das argamassas com substituição parcial de cimento em simultâneo pelos dois resíduos: resíduo de FCC e resíduo de PN (recorrendo à notação apresentada na Tabela 3.1) também com, e sem, adição de superplastificante.

Tabela 4.26 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão (MPa) para as argamassas com substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e resíduo de PN.

% substituição de cimento por resíduos	Designação da argamassa	Idade dos provetes (dias)		
		2	7	28
	Ref	27,1	36,5	45,5
	Ref_SP	35,7	46,5	53,3
20%	FCC,rPN	19,9	33,5	43,1
	FCCm,rPN	19,8	34,5	45,6
	FCC, rPN_SP	23,1	41,4	53,3
	FCCm,rPN_SP	28,4	42,1	57,4
25%	FCC,rPN	12,5	24,7	34,6
	FCCm,rPN	14,7	29,3	41,4
	FCC, rPN_SP	25,2	39,4	50,7
	FCCm,rPN_SP	25,9	41,6	54,7
30%	FCC,rPN	17,4	27,8	36,4
	FCCm,rPN	12,4	29,3	41,8
	FCC, rPN_SP	19,9	35,5	46,3
	FCCm,rPN_SP	22,5	37,9	53,5

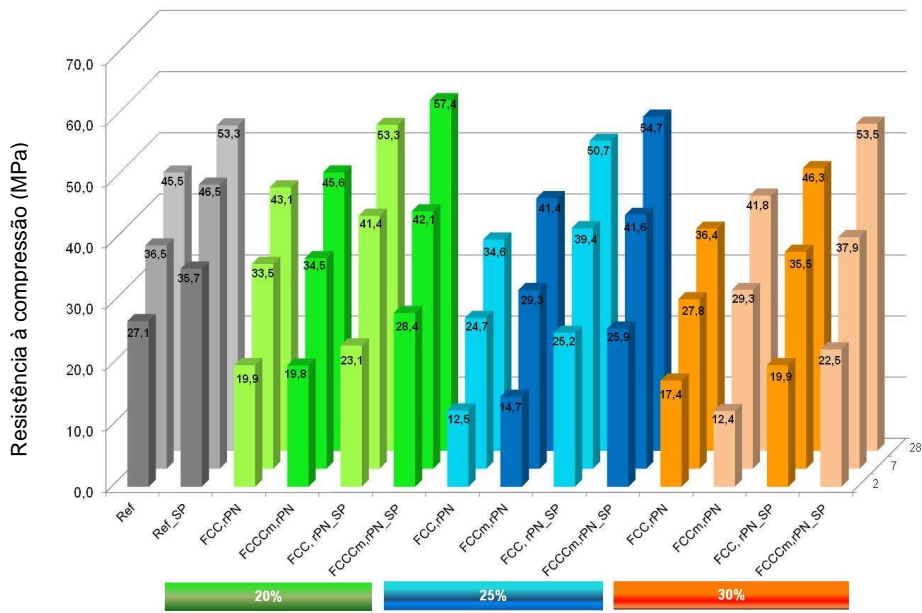


Figura 4.27 – Representação gráfica dos resultados da Tabela 4.26, referentes à resistência à compressão das argamassas de referência e das argamassas com substituição de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e resíduo de rPN.

Na Tabela 4.27 e Tabela 4.28 apresenta-se o Índice de Actividade (IA) recorrendo à expressão 4.1.

Tabela 4.27 – Índice de actividade da resistência à compressão das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e de pedra natural, sem adição de superplastificante.

Idade dos provetes (dias)	Designação da argamassa						
	Ref.	C80_ (rFCC,rPN)20	C80_ (rFCCm,rPN)20	C75_ (rFCC,rPN)25	C75_ (rFCCm,rPN)25	C70_ (rFCC,rPN)30	C70_ (rFCCm,rPN)30
2	100,0	73,4	73,2	46,1	54,4	64,1	45,7
7	100,0	91,8	94,3	67,6	80,1	75,9	80,1
28	100,0	94,7	100,1	75,9	90,8	79,8	91,7

Tabela 4.28 – Índice de actividade da resistência à compressão das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC e de pedra natural, com adição de superplastificante.

Idade dos provetes (dias)	Designação da argamassa						
	Ref_SP	C80_ (rFCC,rPN)20 _SP	C80_ (rFCCm,rPN)20 _SP	C75_ (rFCC,rPN)25 _SP	C75_ (rFCCm,rPN)25 _SP	C70_ (rFCC,rPN)30 _SP	C70_ (rFCCm,rPN)30 _SP
2	100,0	64,8	79,6	70,6	72,5	55,7	63,0
7	100,0	89,0	90,6	84,7	89,4	76,4	81,5
28	100,0	100,0	107,8	95,2	102,7	86,8	100,5

Analisando estes resultados incluídos na Tabela 4.26 (representados na Figura 4.27) e na Tabela 4.27e Tabela 4.28, observa-se que:

- Aos 2 dias de cura apenas as argamassas com introdução de superplastificante satisfazem os requisitos mecânicos exigidos na norma NP EN 197-1:2001 (20MPa);
- Aos 28 dias pode-se verificar que as todas as argamassas com 20% de substituição de cimento por resíduo de PN e de FCC (com adição de superplastificante), cumprem os requisitos mecânicos da referida norma – 42,5MPa - chegando mesmo a superar estes requisitos com um valor bastante significativo;
- Em argamassas sem introdução de SP, aos 28 dias, apenas as argamassas com 20% de substituição de cimento por resíduos, cumprem os requisitos da NP EN 197-1:2001;
- Verifica-se ainda que, nas argamassas com substituição de cimento, simultaneamente, por resíduo de PN e resíduo de FCC, a incorporação do resíduo de FCC moído traduz-se num aumento dos valores da resistência à compressão, de tal forma que nas argamassas com adição de superplastificante (Tabela 4.26) o valor da resistência à compressão aos 28 dias é superior ao da argamassa de referência. Parece assim, que a moagem do resíduo de FCC permite a incorporação de quantidade significativa dos dois resíduos sem afectar a resistência à compressão. No entanto, como foi sendo dito ao longo desta dissertação a avaliação do efeito da moagem das partículas do catalisador de FCC exige trabalho adicional.

Na Tabela 4.29 e Figura 4.28 encontram-se reproduzidos os valores das argamassas com substituição de cimento por resíduo de pedra natural e por resíduo de FCC (moído e tal como foi recebido da refinaria de Sines) e da argamassa com 10% de substituição de cimento por resíduo de FCC. Fez-se esta análise porque, como foi referido anteriormente, a 25% de substituição de cimento por rFCC+rPN corresponde uma substituição de 10% de cimento por resíduo de FCC (Tabela 3.1). Analisando os resultados verifica-se que:

- a argamassa com 10% de substituição de cimento apenas por resíduo de FCC apresenta, para todas as idades, melhor resistência à compressão dos que as argamassas com igual teor de incorporação de resíduo de FCC – moído e tal como recepcionado da refinaria – e com percentagem total de substituição de cimento por ambos os resíduos: de FCC e de PN.

Tabela 4.29 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão (reproduzidos da Tabela 4.23 e da Tabela 4.26), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com 25% de substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP).

Idade dos provetes (dias)	Designação da argamassa			
	Ref_SP	C75_ (rFCC,rPN)25 _SP	C75_ (rFCCm,rPN)25 _SP	C90_ rFCC10 _SP
2	35,7	25,2	25,9	30,8
7	46,5	39,4	41,6	46,8
28	53,3	50,7	54,7	56,2

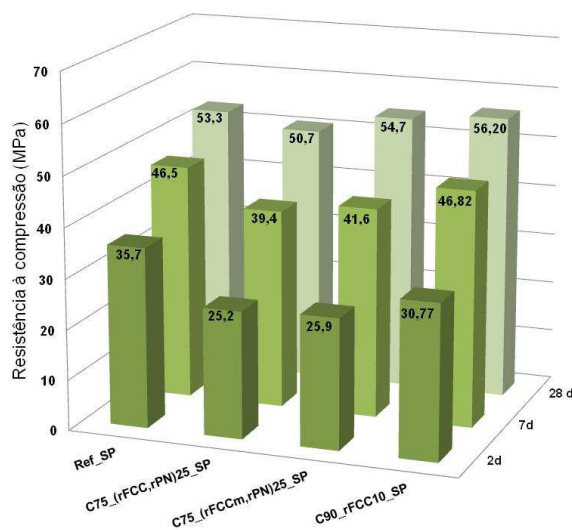


Figura 4.28 – Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão (reproduzidos da Tabela 4.29), comparando resultados das argamassas de referência, das argamassas com substituição parcial de cimento por rFCC – tal como recebido da refinaria e moído – e por rPN, e para as argamassas com 10% de substituição de cimento por rFCC, com introdução de superplastificante (SP).



## 5 CONCLUSÕES

---

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões deste trabalho em relação (i) ao efeito da do teor de resíduo da indústria petroquímica incorporado em cimento, nas propriedades reológicas e mecânicas, e (ii) à correspondência destes cimentos, com incorporação de resíduos, às especificações requeridas pelas normas europeias em vigor nomeadamente à NP EN 197-1:2001 [6]. Apresentam-se, ainda, as conclusões dos estudos preliminares realizados para avaliar o efeito da moagem das partículas do resíduo da indústria petroquímica e para avaliar o papel sinérgico da presença simultânea deste resíduo e de um resíduo da indústria transformadora da pedra calcária natural. A realização destes estudos incluiu a realização de ensaios no estado fresco (Subcapítulo 3.4) e no estado endurecido (Subcapítulo 3.7).

A partir dos ensaios realizados no estado fresco em argamassas com incorporação de rFCC salientam-se as seguintes conclusões:

- O aumento do teor de cimento substituído por rFCC traduz-se na diminuição linear da fluidez das argamassas produzidas (Figura 4.1);
- O aumento do teor de cimento substituído por rFCC traduz-se na diminuição da massa volúmica das argamassas (Figura 4.7);
- O aumento do teor de cimento substituído por rFCC incorporado até 15%, em massa, traduz-se no aumento do teor de ar das argamassas. Teores de incorporação de rFCC superiores (20 e 25%) conduzem à diminuição do teor de ar (Figura 4.13).

A partir dos ensaios realizados no estado endurecido em argamassas com incorporação de rFCC salientam-se as seguintes conclusões que se sistematizam nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2:

- Substituição parcial de cimento por 25 e 30% de rFCC, em massa, não permite preparar argamassas homogêneas, coesas e trabalháveis pelo que os resultados dos ensaios mecânicos não têm significado;
- A substituição parcial de cimento por rFCC até 20%, em massa, conduz sempre à obtenção de argamassas com menor resistência à flexão do que a argamassa de referência;
- Aos 7 dias de hidratação, os cimentos com incorporação de rFCC até 10%, em massa, já apresentam valores de resistência à compressão iguais, ou maiores do que a argamassa de referência;
- A incorporação de 15 e 20%, em massa, de rFCC no cimento atrasa o desenvolvimento da resistência das argamassas. Contudo, verifica-se, com base na análise dos valores do IA, a existência de actividade pozolânica a partir dos 7 e 28 dias de idade, respectivamente, para aquelas percentagens de incorporação e que a partir destas idades a resistência à compressão é sensivelmente superior a 90% da resistência da argamassa de referência;

- No que respeita aos requisitos mecânicos a que os cimentos da classe de resistência 42,5R devem corresponder para estarem conforme a norma NP EN 197-1:2001 [6], verifica-se que os aqueles requisitos são verificados pelos cimentos com incorporação de rFCC até 15%, em massa, uma vez que apresentam resistência à compressão superior a 20,0 MPa ao fim de dois dias de hidratação e superior a 42,5 MPa ao fim de 28 dias de hidratação (subsecção 4.2.2).

Tabela 5.1 – Sistematização dos Índices de Actividade das argamassas<sup>1</sup> com substituição parcial de cimento por rFCC.

Designação das argamassas	IA relativo à resistência à flexão (aos 2, 7 e 28 dias)					IA relativo à resistência à compressão (aos 2, 7 e 28 dias)				
	2	7	28	56	90	2	7	28	56	90
	REF_SP	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C95_rFCC5_SP	90,5	88,4	98,9	96,1	94,2	93,5	99,9	102,9	103,3	101,2
C90_rFCC10_SP	80,0	83,3	86,6	93,8	91,2	86,2	100,7	105,5	100,7	103,3
C85_rFCC15_SP	72,0	76,0	80,7	75,8	80,9	74,3	90,4	98,2	96,2	101,1
C80_rFCC20_SP	46,1	65,0	71,5	76,6	65,8	50,1	74,2	90,0	89,5	86,3

Tabela 5.2 – Valores da resistência à compressão das argamassas produzidas com os cimentos com incorporação dos resíduos (os valores que estão conforme a norma NP EN 197:2001 apresentam-se a **bold**)

Designação das argamassas	Resistência à compressão (MPa) (aos 2, 7, 28, 56 e 90 dias)				
	2	7	28	56	90
C95_rFCC5_SP	<b>33,4</b>	46,5	<b>54,8</b>	59,2	60,8
C90_rFCC10_SP	<b>30,8</b>	46,8	<b>56,2</b>	57,7	62,1
C85_rFCC15_SP	<b>26,5</b>	42,0	<b>52,3</b>	55,1	60,8
C80_rFCC20_SP	17,9	34,5	<b>48,0</b>	51,3	51,9

O volume dos estudos realizados, neste trabalho, com cimento parcialmente substituído: (i) por resíduo de catalisador exausto de FCC que foi moído, rFCCm, e (ii) simultaneamente, por rFCC e rPN, não foi exaustivo o suficiente para serem considerados completos. A principal motivação destes estudos era a avaliar a eventual importância dos seus aprofundamentos tendo-se identificado que tanto um como o outro devia ser desenvolvido. Salientam-se as principais observações que se verificaram nestes estudos preliminares. No que diz respeito aos ensaios no estado fresco verificou-se que:

<sup>1</sup> O Índice de Actividade é a relação entre a resistência da argamassa produzida com uma dada percentagem de substituição de cimento por resíduo(s) com uma dada idade e a resistência da argamassa de referência (sem substituição de cimento por resíduo(s)) com a mesma idade (explicado com mais pormenor no Subcapítulo 4.2)

- Em misturas binárias, a substituição de cimento por rFCC moído traduz-se na diminuição da fluidez das argamassas produzidas, quando comparadas com a argamassa de referência (Figura 4.2) e num aumento da fluidez das argamassas, quando comparadas com a argamassa com substituição de cimento por rFCC tal como foi recebido da refinaria de Sines (Figura 4.3);
- Em misturas binárias, a substituição de cimento por rFCC moído traduz-se na diminuição da massa volúmica das argamassas produzidas, quando comparadas com a argamassa de referência e com a argamassa com substituição de cimento por rFCC tal como foi recebido da refinaria de Sines (Figura 4.9);
- Em misturas binárias, a substituição de cimento por rFCC moído traduz-se na diminuição do teor em ar das argamassas produzidas, quando comparadas com a argamassa de referência (Figura 4.14) e num aumento do teor em ar das argamassas produzidas, quando comparadas com a argamassa com substituição de cimento por rFCC tal como foi recebido da refinaria de Sines (Figura 4.15);
- Em misturas ternárias, a substituição de cimento por rFCC e por rPN traduz-se na diminuição da fluidez das argamassas produzidas, quando comparadas com a argamassa de referência (Figura 4.4 e Figura 4.5);
- A argamassa com 10% de substituição de cimento por rFCC apresenta menor fluidez do que as argamassas com 25% de substituição de cimento por rFCC e rPN (que corresponde a 10% de rFCC e 15% de rPN); Em misturas ternárias, a substituição de cimento por rFCC e por rPN traduz-se na diminuição da massa volúmica das argamassas produzidas, quando comparadas com a argamassa de referência (Figura 4.4 e Figura 4.5);
- A argamassa com 10% de substituição de cimento por rFCC apresenta menor massa volúmica do que as argamassas com 25% de substituição de cimento por rFCC e rPN (que corresponde a 10% de rFCC e 15% de rPN);
- Em misturas ternárias, a substituição de cimento por rFCC e por rPN traduz-se no aumento do teor em ar das argamassas produzidas sem superplastificante, quando comparadas com a argamassa de referência (Figura 4.16) e, tipicamente, numa redução do teor em ar (com introdução de superplastificante), quando comparadas com as argamassas de referência.
- A argamassa com 10% de substituição de cimento por rFCC apresenta maior teor em ar do que as argamassas com 25% de substituição de cimento por rFCC e rPN (que corresponde a 10% de rFCC e 15% de rPN);

A partir dos ensaios realizados no estado endurecido salientam-se as seguintes conclusões que se sistematizam nas Tabela 5.3 e Tabela 5.4:

- Em todos os tempos de hidratação, as argamassas com substituição de cimento por rFCC moído apresenta valores de resistência à flexão e à compressão iguais ou superiores aos da argamassa de referência;

- Aos 28 dias de hidratação, os cimentos com 20% de incorporação de rFCC e rPN, em massa, produzem argamassas com valores de resistência à flexão superiores aos da argamassa de referência independentemente do resíduo de rFCC ser moído ou não e de às argamassas se ter adicionado ou não, superplastificante;
- Aos 28 dias de hidratação, os cimentos com 25% e 30% de incorporação de rFCC e rPN, em massa, produzem argamassas com valores de resistência à flexão superiores aos da argamassa de referência, apenas utilizando o rFCC moído e com introdução de superplastificante;
- Aos 28 dias, a argamassa com 10% de substituição de cimento por rFCC apresenta menor resistência à flexão do que as argamassas com 25% de substituição de cimento simultaneamente por rFCC e rPN (que corresponde aos mesmos 10% de incorporação rFCC e a 15% de incorporação de rPN);
- Aos 28 dias de hidratação, os cimentos com 20% de incorporação, em massa, de rFCC moído e rPN, sem superplastificante, bem como os cimentos com 20% de incorporação de rFCC e rPN com superplastificante - independentemente de o catalisador ter sido ou não moído - produzem argamassas com valores de resistência à compressão superiores aos da argamassa de referência;
- Aos 28 dias de hidratação, os cimentos com 25 e 30% de incorporação, em massa, de rFCC moído e rPN (com introdução de superplastificante), produzem argamassas com valores de resistência à compressão superiores aos da argamassa de referência;
- Aos 28 dias, a argamassa com 10% de substituição de cimento por rFCC apresenta maior resistência à compressão do que as argamassas com 25% de substituição de cimento simultaneamente por rFCC e rPN (que corresponde a 10% de incorporação rFCC e a 15% de incorporação de rPN);
- No que respeita aos requisitos mecânicos a que os cimentos da classe de resistência 42,5R devem corresponder para estarem conforme a norma NP EN 197-1:2001 [6], verifica-se que os aqueles requisitos são verificados pelos cimentos com incorporação de 20%, 25% e 30%, em massa, de rFCC e rPN (em simultâneo) desde que se adicione superplastificante independentemente do resíduo de FCC ter sido ou não moído.

Tabela 5.3 – Sistematização dos Índices de Actividade das argamassas<sup>2</sup> com substituição parcial de cimento simultaneamente por rFCC e rPN e, ainda, por rFCCm e rPN (com e sem adição de superplastificante).

Designação das argamassas	IA relativo à resistência à flexão (aos 2, 7 e 28 dias)			IA relativo à resistência à compressão (aos 2, 7 e 28 dias)		
	2	7	28	2	7	28
REF.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C80_(rFCC, rPN)20	61,1	78,0	101,8	73,4	91,8	94,7
C75_(rFCC, rPN)25	38,5	66,7	78,4	46,1	67,6	75,9
C70_(rFCC, rPN)30	47,3	73,2	81,2	64,2	75,9	79,8
C80_(rFCCm, rPN)20	72,7	89,5	101,8	73,2	94,4	100,0
C75_(rFCCm, rPN)25	50,0	85,5	87,9	54,4	80,1	90,8
C70_(rFCCm, rPN)30	47,3	73,6	91,1	45,7	80,1	91,7
REF_SP	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C80_(rFCC, rPN)20_SP	100,9	92,1	105,9	64,8	89,0	100,1
C75_(rFCC, rPN)25_SP	74,2	85,2	94,2	70,6	84,7	95,2
C70_(rFCC, rPN)30_SP	56,5	76,2	87,3	55,7	76,4	86,8
C80_(rFCCm, rPN)20_SP	76,3	92,1	108,4	79,7	90,6	107,8
C75_(rFCCm, rPN)25_SP	75,1	97,9	109,4	72,5	89,4	102,7
C70_(rFCCm, rPN)30_SP	66,0	88,1	112,2	63,0	81,5	100,5

Tabela 5.4 – Valores da resistência à compressão das argamassas produzidas com os cimentos com incorporação dos resíduos (os valores que estão conforme a norma NP EN 197:2001 apresentam-se a **bold**)

Designação das argamassas	Resistência à compressão (MPa) (aos 2, 7 e 28 dias)		
	2 dias	7 dias	28 dias
C80_(rFCC, rPN)20	19,9	33,5	<b>43,1</b>
C75_(rFCC, rPN)25	12,5	24,7	34,6
C70_(rFCC, rPN)30	17,4	27,8	36,4
C80_(rFCCm, rPN)20	19,8	34,5	<b>45,6</b>
C75_(rFCCm, rPN)25	14,7	29,3	41,4
C70_(rFCCm, rPN)30	12,4	29,3	41,8
C80_(rFCC, rPN)20_SP	<b>23,1</b>	41,4	<b>53,3</b>
C75_(rFCC, rPN)25_SP	<b>25,2</b>	39,4	<b>50,7</b>
C70_(rFCC, rPN)30_SP	<b>19,9</b>	35,5	<b>46,3</b>
C80_(rFCCm, rPN)20_SP	<b>28,4</b>	42,1	<b>57,4</b>
C75_(rFCCm, rPN)25_SP	<b>25,9</b>	41,6	<b>54,7</b>
C70_(rFCCm, rPN)30_SP	<b>22,5</b>	37,9	<b>53,5</b>

<sup>2</sup> O Índice de Actividade é a relação entre a resistência da argamassa produzida com uma dada percentagem de substituição de cimento por resíduo(s) com uma dada idade e a resistência da argamassa de referência (sem substituição de cimento por resíduo(s)) com a mesma idade (explicado com mais pormenor no Subcapítulo 4.2)

- Finalmente, deve ser referido que, embora o resíduo de catalisador exausto de FCC seja um material potencialmente pozolânico, é importante determinar o teor mais adequado de substituição de cimento por este resíduo.

## PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

---

Nos pontos seguintes são destacadas algumas das questões mais importantes a abordar em desenvolvimentos futuros na investigação de resíduo de catalisador exausto de FCC e do resíduo de pedra natural.

- Estudar argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de catalisador exausto de FCC moído para percentagens superiores a 5% e inferiores a 30% para determinar o efeito da moagem do resíduo de catalisador exausto de FCC no cimento;
- Elaborar um estudo mais sistemático da substituição de cimento simultaneamente por resíduo de catalisador exausto de FCC e por resíduo de pedra natural;
- Avaliar a resistência química e comportamento a longo prazo das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos.





## BIBLIOGRAFIA

---

1. DAMTOFT, J. S.; LUKASIK, J.; AL, E. **Sustainable development and climate change initiatives**. [S.l.]: [s.n.], 2008.
2. WORLD Business Council for Sustainable Development (WBCSD). **Cement Sustainability Initiative**, 2002. Disponível em: <[http://www.wbcسد.org/pdf/agenda\\_summary.pdf](http://www.wbcسد.org/pdf/agenda_summary.pdf)>. Acesso em: 23 Março 2010.
3. WORRELL, E. P. et al. **Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. Anual Review of Energy and the Environment 26(1)**: 303-329. [S.l.]: [s.n.], 2001.
4. SCRIVENER, K. L. K. . R. J. **Innovation in use and research on cimentitious material. Cement and Concrete Reseach 38(2)**: 128-136. [S.l.]: [s.n.], 2008.
5. PHAIR, J. W. **Green chemistry for sustainable cement production and use. Green Chem 8**: 763-780. [S.l.]: [s.n.], 2006.
6. NP EN 197-1:2001 Cimento-Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. [S.l.]: [s.n.], 2001.
7. CIMPOR. Disponível em: <<http://www.cimpor.pt>>. Acesso em: Agosto 2011.
8. CEMENT Technology Roadmap, 2009. Disponível em: <[www.iea.org/roadmaps](http://www.iea.org/roadmaps)>. Acesso em: 1 Abril 2011.
9. REVISTA INGENIUM. [S.l.]: Ingenium Edições, Lda., v. II Série, nº122, 2011.
10. CEMENT Technology Roadmap. Disponível em: <[http://www.iea.org/papers/2009/Cement\\_Roadmap.pdf](http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap.pdf)>. Acesso em: Maio 2011.
11. MEHTA, P. K. **Sustainable Cements and Concrete for the Climate Change Era - A Review**. [S.l.]: [s.n.], 2010.
12. KYOTO Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. [S.l.]: [s.n.], 1998.
13. WORLD Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Disponível em: <[http://www.wbcسدcement.org/pdf/agenda\\_po.pdf](http://www.wbcسدcement.org/pdf/agenda_po.pdf)>. Acesso em: Maio 2011.

14. HEWLETT, P. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4<sup>a</sup> ed. [S.I.]: Elsevier. ISBN 070662565. [S.I.]: [s.n.].
15. ASSOCIAÇÃO Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>>. Acesso em: 2011 Julho 2011.
16. INTERNATIONAL Cement Review, Global Cement Report. 8<sup>a</sup> ed. [S.I.]: [s.n.], 2009.
17. COUTINHO, J. S. **Materiais de Construção 2 - 1<sup>a</sup> Parte - Ligantes e caldas**. [S.I.]: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto., 2002.
18. SOUSA, S. P. **Betão eco-Eficiente com cinza de casca de arroz**. Porto: [s.n.], 2005.
19. GOBBI, A. . G. J. A. . M. M. H. F. **Cinza de bagaço de cana-de-açúcar**: Contribuição para a sustentabilidade dos materiais de reparo. VI Congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas, Córdoba, Argentina. [S.I.]: [s.n.], 2010.
20. REIS, R. **Betões Eco-Eficientes com Cinzas Volantes e Metacaulino**. Minho: Universidade do Minho, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. [S.I.]: [s.n.].
21. AHMARUZZAMAN, M. **A review on the utilization of fly ash**. 36<sup>a</sup> ed.[S.I.]: Progress in Energy and Combustion Science, 2010. 327–363 p. [S.I.]: [s.n.].
22. ANTIOHOS, S. K.; CHOULIARA, E.; TSIMAS, S. **RE-USE OF SPENT CATALYST FROM OIL-CRACKING REFINERIES AS SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIAL**. Vol. 4, No. 2, 2006. 73-76 p. [S.I.]: [s.n.].
23. BILIM, C. **Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary**. **Construction and Building Materials**. 2011. [S.I.]: [s.n.].
24. MEYERS, R. A. **Handbook of Petroleum Refining Process**, 3<sup>a</sup> ed. [S.I.]: Mc-Graw Hill.
25. COSTA, C. et al. **Microstructural Analysis of Cement Pastes Blended With Waste Catalysts from Oil Refinery**. European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes EUROMAT 2009, Glasgow, UK. [S.I.]: [s.n.].
26. PACEWSKA, B.; WILINSKA, I.; KUBISSA, J. **Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive**. 322<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: Thermochemica acta, 1998. 175-181 p. [S.I.]: [s.n.].

27. PACEWSKA, B.; BOKOWSKA, M.; NOCUN-WCZELIK, W. **Effect of waste aluminosilicate material on cement hydration and properties of cement mortars.** 32(11). ed. [S.I.]: Cement and Concrete Research, 2002. 1823-1830 p. [S.I.]: [s.n.].
28. SU, N. et al. **Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution.** 30<sup>a</sup> ed. [S.I.]: Cement and Concrete Research, 2000. 1773-1783 p. [S.I.]: [s.n.].
29. PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V. **Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R)-An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures.** 29<sup>a</sup> ed. [S.I.]: Cement and Concrete Research, 1999. 1773-1779 p. [S.I.]: [s.n.].
30. HSU, K. et al. **Oil cracking waste catalyst as an active pozzolanic material for superplasticized mortars.** 31<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: Cement and Concrete Research, 2001. 1815-1820 p. p.
31. PACEWSKA, B. et al. **Modification of the properties of concrete by a new pozzolan. A waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed.** 32<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: Cement and Concrete Research, 2002. 145-152 p. [S.I.]: [s.n.].
32. PERRAKI, T. [ A. ]. **The effect of zeolite on the proprieties and hydration of blended cements.** 32<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: Cement&Concrete Composies, 2010. 128-133 p. [S.I.]: [s.n.].
33. PAYÁ, J. et al. **Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes.** 33<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: Cement and Concrete Research, 2003. 603-609 p. [S.I.]: [s.n.].
34. PINTO, C.; BUCHLER, P.; DWECK, J. **Pozzolanic proprieties of a residual FCC catalyst during the early stages of cement hydration - Evaluation by thermal analysis.** [S.I.]: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 87, 2007. 715-720 p.
35. DWECK, J.; PINTO, C.; BUCHLER, P. **Study of a brazilian spent catalyst as cement aggregate by thermal and mechanical analysis.** [S.I.]: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 92, 2008. 121-127 p.
36. WU, J.; WU, W.; HSU, K. **The effect of waste oil-cracking catalyst on the compressive strength of cement pastes and mortars.** 33. ed. [S.I.]: Cement and Concrete Research, 2003. 245-253 p.
37. GEADA, R.; PEREIRA, J.; COSTA, C. **Waste oil cracking catalyst blended cement.**

- International Materials Symposium. MATERIAIS 2011 and XV Meeting of SPM - Sociedade Portuguesa de Materiais.** Guimarães, Portugal: [s.n.], 2011.
38. PAYÁ, J. et al. **Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements.** 31<sup>a</sup> ed. [S.I.] **Cement and Concrete Research**, 2001. 57-61 p. [S.I.]: [s.n.].
39. CANPOLAT, F. et al. **Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production.** 34<sup>a</sup> ed. [S.I.]: **Cement and Concrete Research**, 2004. 731–735 p. [S.I.]: [s.n.].
40. NP EN 196-1:2006 - Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. [S.I.]: Instituto Português da Qualidade, 2006.
41. EN 1015-3:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). [S.I.]: European Committee for Standardization.
42. EN 1015-6:1998 - Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. [S.I.]: European Committee for Standardization.
43. DIN 18555-2:1982 Determinação do teor de ar de argamassas pelo aerómetro. [S.I.]: [s.n.].
44. SILVA, D. M. M. **Optimização de caldas de cimento para trabalhos de injeção em geotecnia.** Lisboa: [s.n.], 2010.
45. SOCIÉTÉ Nouvelle du Littoral. Disponível em: <<http://www.s-n-l.fr/>>.
46. GRILO, M. J.; PEREIRA, J.; COSTA, C. **Waste marble dust blended cement.** **International Materials Symposium. MATERIAIS 2011 and XV Meeting of SPM - Sociedade Portuguesa de Materiais.** Guimarães, Portugal: [s.n.], 2011.
47. ASTM C311-07. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland - Cement Concrete. [EUA]: American Society for Testing and Materials International, 1-10 p. [S.I.]: [s.n.], 2007.
48. CHEN, H.; TSENG, Y.; HSU, K. **Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars.** 26<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: **Cement & Concrete Composites**, 2004. 657–664 p.
49. LOMAS, M. G.; ROJAS, M. I.; FRÍAS, M. **Pozzolanic reaction of a spent fluid catalytic cracking catalyst in FCC-cement mortars.** [S.I.]: **Journal of Thermal Analysis and**

- Calorimetry, v. 90, 2007. 443–447 p.
50. CUNHA, A. C. et al. **A study of the particle size effect on the pozzolanic activity of an equilibrium catalyst.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2011. [S.l.]: [s.n.].
51. MARLAND, G.; BODEN, T.; BRENKERT, A. **Revised Global CO<sub>2</sub> Emissions from Fossil Fuel Burning, Cement Manufacture and Gas Flaring, 1751-1995.** Oak Ridge, TN: Carbon Dioxide Inf. Anal. Cent. Oak Ridge Natl. Lab. [S.l.]: [s.n.], 1998.
52. TSENG, Y.-C.; HUANH, C. L.; HSU, K. C. **The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials.** 782-787 p. [S.l.]: [s.n.], 2004.
53. DICIONÁRIO Técnico. 3ª Ed. EMO-European Mortar Industry Organization. [S.l.]: [s.n.], 2001.
54. HENDRIKS, C. A. . [ A. **Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry.** [S.l.]: [s.n.], 2004.
55. JALALI, S. . T. F. P. **CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. O CASO DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.** [S.l.]: [s.n.], 2007.
56. SECIL. **Processo de fabrico de cimento.** [S.l.]: [s.n.].
57. DIPAYAN, J. **A NEW LOOK TO AN OLD POZZOLAN: CLINOPTILOLITE – A PROMISING POZZOLAN IN CONCRETE.** Proceeding of the twenty-ninth conference on cement microscopy Quebec City, PQ, Canada May 20-24, 2007. 168-206 p. [S.l.]: [s.n.].
58. CANPOLAT, F. et al. **A reply to the discussion by H. Un of the paper "Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production".** 35ª ed. [S.l.]: Cement and Concrete Research, 2005. 1022– 1023 p. [S.l.]: [s.n.].
59. TORRAL, F.; JALALI, S. **Eco-eficiência dos Materiais de Construção.** [S.l.]: [s.n.]. 47-71 p. n.º 147. [S.l.]: [s.n.], 2010.
60. TORRAL, F.; JALALI, S. **O Futuro da Indústria do Betão Pronto, nº 26.** Lisboa: [s.n.], Abril 2011. 22-27 p. [S.l.]: [s.n.].
61. GARCÍA, R. . V. R. . V. I. . F. M. . R. M. I. S. **The pozzolanic properties of paper sludge waste.** 22(7). ed. [S.l.]: Construction and Building Materials. 1484-1490 p. [S.l.]: [s.n.], 2008.



## ANEXOS

---



## Anexo A

### Anexo A.1 - Os 27 produtos da família de cimentos correntes (fonte: NP EN 197-1:2001)

Tipos principais	Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente)		Composição (percentagem em massa <sup>a</sup> )										Constituintes adicionais minoritários			
			Constituintes principais													
			Cinquer	Escória de alto forno	Sílica de fumo	Pozolana		Cinza volante		Xisto cozido	Calcário					
K	S	D <sup>b</sup>	natural	natural calcinada	siliciosa	calcária	T	L	LL							
CEM I	Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cimento Portland de escória	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de pozolana	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de cinza volante	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cimento Portland composto <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-94	<----- 6-20 ----->							-	-	-	-	-	0-5
CEM II/B-M		65-79	<----- 21-35 ----->							-	-	-	-	-	0-5	
CEM III	Cimento de alto forno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cimento pozolânico <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	-	<----- 11-35 ----->				-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	<----- 36-55 ----->				-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM V	Cimento composto <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->				-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	<----- 31-50 ----->				-	-	-	-	-	0-5	

a) Os valores do quadro referem-se à soma dos constituintes principais e dos adicionais minoritários.


b) A incorporação de sílica de fumo é limitada a 10 %.

c) Nos cimentos Portland compostos CEM II/A-M e CEM II/B-M, nos cimentos pozolânicos CEM IV/A e CEM IV/B e nos cimentos compostos CEM V/A e CEM V/B os constituintes principais, além do cinquer, devem ser declarados na designação do cimento (como exemplo ver secção 8)




## Anexo B – MATERIAIS UTILIZADOS

### Anexo B.1-Ficha técnica do cimento CEM I 42,5R


FICHA TÉCNICA

**Cimento Portland**  
**CEM I 42,5R**



NP EN 197-1 0856

▶ **Constituintes**

Clinker  $\geq 95\%$   
Constituintes adicionais minoritários  $\leq 5\%$   
Sulfato de cálcio regulador de presa

▶ **Características**

▶ **Químicas**

Perda ao fogo (P.F.)  $\leq 5,0\%$   
Resíduo insolúvel (R.I.)  $\leq 5,0\%$   
Sulfatos (SO<sub>3</sub>)  $\leq 4,0\%$   
Cloretos (Cl)  $\leq 0,10\%$

▶ **Físicas**

Início de presa (min)  $\geq 60$   
Expansibilidade (mm)  $\leq 10$

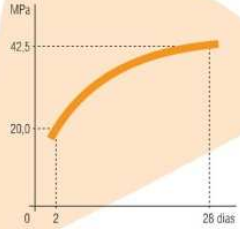
▶ **Mecânicas**


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





Cimento Portland  
CEM I 42,5R



▶ **Utilizações recomendadas**

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

▶ **Acondicionamento**



**Paquete**  
48 Sacos de 35 kg - 1715 kg



**Pacotão**  
55 Sacos de 35kg - 1925 kg

Camião de 25 toneladas com meios de descarga próprios devidamente selado



**Granel**  
25 toneladas

▶ **Precauções na aplicação**

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

▶ **Contra-indicações**

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

▶ **Ambiente e Segurança**

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



**CIPOR**  
INDÚSTRIA DE  
CIMENTOS, S.A.

**ÁREA COMERCIAL**  
Av. Severino Pádua, 8 - Est. Rocio CIPOR - 2669-524 PINDO VELHO  
Tel.: 21 940 90 43 - Fax: 21 340 87 00

**ÁREA TÉCNICO-COMERCIAL**  
Av. Severino Pádua, 8 - Est. Rocio CIPOR - 2669-524 PINDO VELHO  
Tel.: 21 940 90 43 - Fax: 21 340 87 54

**ENGENHARIAS, CONTROLO DE VENDAS E CRÉDITO**  
S. Paulo Freixo - Aldeia - Alameda 1023 - 4440-959 ESTREMOZ  
Tel.: 22 998 90 00 - Fax: 22 997 10 38

www.cipor-cortugal.pt  
Dcomerc@cipor.com

## Anexo B.1 - Fichas técnicas e certificado dos vários tipos de areias utilizados neste estudo

### B..1.1 – Areia S10/20



## INFORMAÇÃO TÉCNICA

DATA SHEET / NOTICE TECHNIQUE

PRODUTO: AREIA  
REF<sup>a</sup>.: S10/20

NATUREZA / NATURE

Areia Cristalina / Sand / Quartz

VALORES TIPO / TYPICAL VALUES / VALEURS TYPE  
Matéria Prima / Raw Material / Matière Première

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS / Chemical Specifications / Caractéristiques Chimiques \*

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
89,69%	7,76%	0,11%	0,02%	0,07%	0,64%	1,58%	0,03%	0,11%	0,002%

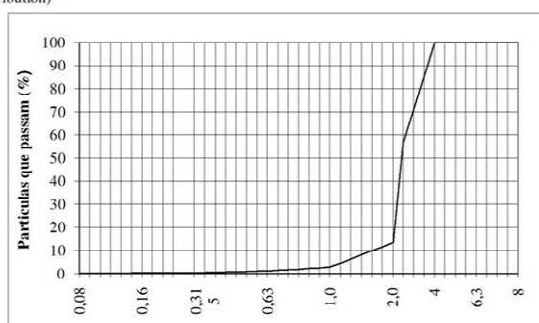
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS / Physical Specifications / Caractéristiques Physiques \*

HUMIDADE (Moisture / Humidité)	0,00%	DIN 53198
BRANCURA (Brightness / Blanchéur)	61,33	L*
DENSIDADE APARENTE (Non Compacted Bulk Density / D.A. Non Tassée)	1,47g/ml	EN 12902
DUREZA MOHS (Mohs Hardness / Dureté Mohs)	7	
ÍNDICE de REFRACÇÃO (Refractive index / Indice de Réfraction)	1,55	
PESO ESPECÍFICO (Specific Gravity / Poids Spécifique)	2,64g/ml	EN 12902
Ph	7	ISO 787/9
CORTE SUPERIOR (Top Cut / Coupure)	3,15mm	



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (Particle size distribution)\*

PENEIROS	RETIDO	ACUMULADO	PASSA
mm	%	%	%
8	0,00	0,00	100,00
6,3	0,00	0,00	100,00
4	7,96	7,96	100,00
2,0	78,45	86,41	13,59
1,0	10,81	97,22	2,78
0,63	1,61	98,83	1,17
0,315	0,68	99,51	0,49
0,16	0,19	99,70	0,30
0,08	0,11	99,81	0,19
<0,08	0,19	100,00	



PENEIROS DE CONTROLO DIN ISO 3310-1

A elaboração deste produto baseia-se numa matéria prima natural, pelo que nos reservamos o direito de alteração dos valores apresentados.

As this product is based on naturally occurring raw materials we reserve the right to change this should it become necessary.

Ce produit étant élaboré à partir d'une matière première naturelle, nous nous réservons le droit de modifier les valeurs données.

\* VALORES INDICATIVOS (Indicatif values / Valeurs indicatives)

B.1.2 – Areia AS30/40**INFORMAÇÃO TÉCNICA**

DATA SHEET / NOTICE TECHNIQUE

PRODUTO: AREIA  
REF<sup>a</sup>: AS 30/40

NATUREZA / NATURE **Areia Cristalina / Sand / Quartz**

VALORES TIPO / TYPICAL VALUES / VALEURS TYPE

**Matéria Prima / Raw Material / Matière Première**

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS / Chemical Specifications / Caractéristiques Chimiques \*

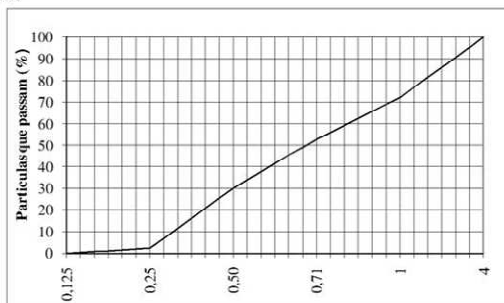
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
98,39%	1,130%	0,041%	0,016%	0,070%	0,270%	0,244%	0,020%	0,012%	0,001%

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS / Physical Specifications / Caractéristiques Physiques \*

HUMIDADE (Moisture / Humidité)	0% máx	DIN 53198
BRANCURA (Brightness / Blancheur)	77,24	L*
DENSIDADE APARENTE (Non Compacted Bulk Density / D.A. Non Tassée)	1,58g/cm <sup>3</sup>	ISO 903
DUREZA MOHS (Mohs Hardness / Dureté Mohs)	7	
ÍNDICE de REFRAÇÃO (Refractive index / Indice de Réfraction)	1,55	
PESO ESPECÍFICO (Specific Gravity / Poids Spécifique)	2,65g/cm <sup>3</sup>	DIN 53193
Ph	7	ISO 787/9
CORTE SUPERIOR (Top Cut / Coupure)	1,4mm	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (Particle size distribution)\*

PENEIROS mm	RETIDO %	ACUMULADO %	PASSA %
4	0,00	0,00	100,00
1	27,65	27,65	72,35
0,71	19,37	47,02	52,98
0,5	22,81	69,83	30,17
0,25	27,64	97,47	2,53
0,125	2,38	99,85	0,15
<0,125	0,15	100,00	



PENEIROS DE CONTROLO DIN ISO-3310

A elaboração deste produto baseia-se numa matéria prima natural, pelo que nos reservamos o direito de alteração dos valores apresentados.

As this product is based on naturally occurring raw materials we reserve the right to change this should it become necessary.  
Ce produit étant élaboré à partir d'une matière première naturelle, nous nous réservons le droit de modifier les valeurs données.

\* VALORES INDICATIVOS (Indicatif values / Valeurs indicatives)

B.1.3 – Areia S90/100**INFORMAÇÃO TÉCNICA**

DATA SHEET / NOTICE TECHNIQUE

**PRODUTO:AREIA  
REF<sup>a</sup>.:S90/100**

1328 - CPD - 0033

NATUREZA / NATURE **Areia Cristalina / Sand / Quartz**

VALORES TIPO / TYPICAL VALUES / VALEURS TYPE

**Matéria Prima / Raw Material / Matière Première**

CARACTERISTICAS QUÍMICAS / Chemical Specifications / Caractéristiques Chimiques \*

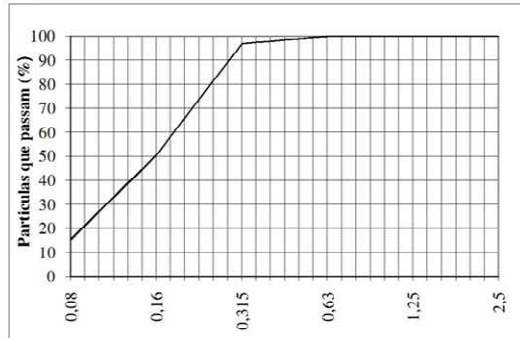
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
97.579%	1.230%	0.210%	0.020%	0.060%	0.220%	0.067%	0.580%	0.028%	0.005%

CARACTERISTICAS FÍSICAS / Physical Specifications / Caractéristiques Physiques \*

HUMIDADE (Moisture / Humidité)	0,00%	DIN 53198
DENSIDADE APARENTE (Non Compacted Bulk Density / D.A. Non Tassée)	1.58g/ml	EN 12902
DUREZA MOHS (Mohs Hardness / Dureté Mohs)	7	
ÍNDICE de REFRAÇÃO (Refractive index / Indice de Réfraction)	1,55	
PESO ESPECÍFICO (Specific Gravity / Poids Spécifique)	2,67mg/m <sup>3</sup>	NP EN 1097-6
Ph	7	ISO 7879
AFA	88	
CORTE SUPERIOR (Top Cut / Coupure)	1mm	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (Particle size distribution)\*

PENEIROS mm	RETIDO %	ACUMULADO %	PASSA %
2,5	0,00	0,00	100,00
1,25	0,00	0,00	100,00
0,63	0,00	0,00	100,00
0,315	2,94	2,94	97,06
0,16	46,47	49,41	50,59
0,08	35,16	84,57	15,43
<0,08	15,43	100,00	



PENEIROS DE CONTROLO DIN ISO-3310

A elaboração deste produto baseia-se numa matéria prima natural, pelo que nos reservamos o direito de alteração dos valores apresentados.

As this product is based on naturally occurring raw materials we reserve the right to change this should it become necessary.

Ce produit étant élaboré à partir d'une matière première naturelle, nous nous réservons le droit de modifier les valeurs données.

\* VALORES INDICATIVOS (Indicatif values / Valeurs indicatives)

## B.1.4 – Certificado de controlo de produção na fábrica



### CERTIFICADO DE CONTROLO DE PRODUÇÃO NA FÁBRICA

**1328 – CPD – 0033**

De acordo com a Directiva 89/106/CEE, de 21 de Dezembro de 1988, do Conselho das Comunidades Europeias, relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-membros no que respeita aos produtos de construção (Directiva dos Produtos de Construção – DPC), alterada pela Directiva 93/68/CEE do Conselho das Comunidades Europeias, de 22 de Julho de 1993, declara-se que o produto de construção

#### AGREGADOS

De acordo com a utilização prevista e características técnicas descritas em anexo,

produzido pelo fabricante

**SIFUCEL – Sílicas, S.A.**

Zona Industrial de Rio Maior, 2040-357 Rio Maior, Portugal

nas fábricas

Unidade de Rio Maior  
Zona Industrial de Rio Maior  
2040-357 Rio Maior, Portugal

Unidade de Alcácer do Sal  
Castelo Ventoso – Albergaria  
7580 Alcácer do Sal, Portugal

Unidade de Mosteiros  
Xartinho - Alcanede  
2025-158 Alcanede, Portugal

é submetido pelo fabricante aos ensaios iniciais de tipo, a um controlo de produção na fábrica e a ensaios complementares de amostras colhidas na fábrica, de acordo com um plano de ensaios pré-estabelecido, e que o organismo notificado – CERTIF Associação para a Certificação – realizou uma auditoria inicial à fábrica e ao controlo de produção, e efectua o acompanhamento contínuo, a avaliação e a aprovação do controlo de produção na fábrica.

Este certificado atesta que todas as disposições relativas à comprovação da conformidade e ao desempenho do produto descritas no Anexo ZA das normas:

**EN 12620:2002, EN 12620:2002/A1:2008, EN 13139:2002, EN 13139:2002/AC:2004.**

foram consideradas.

Este certificado foi emitido pela primeira vez em 2005-09-08 e mantém-se válido desde que não se alterem significativamente as condições definidas na especificação técnica harmonizada ou as condições de fabrico e do controlo de produção na fábrica.

Almada, 13 de Outubro de 2009

Francisco Barroca  
Director Geral

*Este Certificado é constituído por um Anexo com 2 (duas) página.*



## ANEXO AO CERTIFICADO DE CONTROLO DE PRODUÇÃO NA FÁBRICA

**1328 – CPD – 0033**

Local de produção	Unidade de Rio Maior Zona Industrial de Rio Maior, 2040-357 Rio Maior, Portugal
Tipo de agregado	Quartzo e feldspato
Origem de extracção	Areiro

Referência comercial	Dimensão do agregado (d/D)	EN 12620	EN 13139
S30/40	0/1	Agregado fino	0/1
S40	0/1	Agregado fino	0/1
S40/45	0/1	Agregado fino	0/1
S50	0/1	Agregado fino	0/1
S55/60	0/1	Agregado fino	0/1
S90/100	0/1	Agregado fino	0/1
SS40	Filer	Filer	Filer
SS60	Filer	Filer	Filer
SS70	Filer	Filer	Filer
SS100	Filer	Filer	Filer
SS160	Filer	Filer	Filer

Utilização prevista	
EN 12620:2002	Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil
EN 13139:2002	Argamassas para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil

Almada, 13 de Outubro de 2009

Francisco Barroca  
Director Geral



# Certificado

## ANEXO AO CERTIFICADO DE CONTROLO DE PRODUÇÃO NA FÁBRICA

1328 – CPD – 0033

Local de produção	Unidade de Alcácer do Sal Castelo Ventoso – Albergaria, 7580 Alcácer do Sal, Portugal
Tipo de agregado	Quartzo e feldspato
Origem de extracção	Areiro

Referência comercial	Dimensão do agregado (d/D)	EN 12620	EN 13139
AS40	0/1	Agregado fino	0/1
AS50	0/1	Agregado fino	0/1
AS30/40	0/1	Agregado fino	0/1
AS60/30	0/1	Agregado fino	0/1

Local de produção	Unidade de Mosteiros Xarinho, 2025-158 Alcanede, Portugal
Tipo de agregado	Quartzo e feldspato
Origem de extracção	Areiro

Referência comercial	Dimensão do agregado (d/D)	EN 12620	EN 13139
SM60/30	0/4	Agregado fino	0/4
SM1/20	0/1	Agregado fino	0/1

Utilização prevista	
EN 12620:2002	Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil
EN 13139:2002	Argamassas para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil

Almada, 13 de Outubro de 2009

Francisco Barroca  
Director Geral

Pag 2de 2

## Anexo B.2 - Relatórios de ensaio dos materiais utilizados

## B.2.1 - Características do cimento CEM I 42,5 R

## Relatório de Ensaio

Laboratório Central  
do Grupo CimporEdifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8  
2689-524 Prior Velho-Portugal  
Tel: 21 940 8600 - Fax: 21 942 2901

<b>Cliente/Endereço:</b> Laboratório Central do Grupo Cimpor Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8 2689-524 Prior Velho Portugal	<b>Relatório N°</b>	0198B
	<b>Processo N°</b>	3557AO
	<b>Material</b>	CEM I 42,5 R
	<b>Colheita</b>	2010-06-18
	<b>Entrada</b>	2010-06-21
<b>Proveniência:</b> Laboratório Central do Grupo Cimpor	<b>Saída</b>	2010-06-29
		Página 1 / 6

Este relatório não pode ser reproduzido integral ou parcialmente sem a autorização prévia do LC

Ident. da Amostra no Cliente **CI4R - ISEL** N° da Amostra **1388D**

Ensaio	Resultado/Média	Método
Humidade (110°C)	= 0,11 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6) NA
Perda ao Fogo (110-250°C)	= 0,19 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6) NA
Perda ao Fogo (250-500°C)	= 0,26 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6) NA
Perda ao Fogo (500-950°C)	= 2,24 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6) NA
Perda ao Fogo	= 2,70 ±0,19 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6)
Óxido de Silício	= 19,41 ±0,41 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)
Óxido de Alumínio	= 5,45 ±0,14 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)
Óxido de Ferro (III)	= 3,23 ±0,12 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)
Óxido de Cálcio Total	= 62,57 ±0,58 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)
Óxido de Magnésio	= 1,91 ±0,12 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)
Trióxido de Enxofre	= 2,89 ±0,07 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)
Óxido de Potássio	= 1,10 ±0,06 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)
Óxido de Titânio	= 0,27 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Fósforo	= 0,10 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Manganês (II)	= 0,05 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Estrôncio	= 0,07 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Total	= 99,75 %	Cálculo NA
Resistência Flexão 2 dias	= 5,8 MPa	NP EN 196-1 : 2006
Resistência Compressão 2 dias	= 27,2 MPa	NP EN 196-1 : 2006
Espalhamento	= 90,3 %	Método Interno NA
Análise por Difrração de Raios X	=	Difrração de Raios X NA

Data da realização de ensaios: Início 2010-06-23 Fim 2010-06-25

OBS: A colheita da amostra foi da responsabilidade do cliente.

(NA) Ensaio Não Acreditado.

REN 503 13/D

O Técnico:

O Chefe do LC:

João Pereira

Os resultados deste relatório são apenas  
válidos para os itens ensaiados

## B.2.2 - Características do resíduo de pedra natural

## Relatório de Ensaio

Laboratório Central  
do Grupo Cimpor

Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8  
2669-524 Prior Velho-Portugal  
Tel: 21 940 8600 - Fax: 21 942 2901



L0218  
Ensaios

<b>Cliente/Endereço:</b> Laboratório Central do Grupo Cimpor Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8 2689-524 Prior Velho Portugal	<b>Relatório N°</b>	0198B
	<b>Processo N°</b>	3557AO
	<b>Material</b>	Pó
	<b>Colheita</b>	2010-06-18
	<b>Entrada</b>	2010-06-21
<b>Saida</b>	2010-06-29	
<b>Proveniência:</b> ISEL		<b>Página</b> 2 / 6

Este relatório não pode ser reproduzido integral ou parcialmente sem a autorização prévia do LC

Ident. da Amostra no Cliente **Pó de Marmore - ISEL** N° da Amostra **1389D**

Ensaio	Resultado/Média	Método
Humidade (110°C)	= 0,03 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6) NA
Perda ao Fogo (110-250°C)	= 0,05 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6) NA
Perda ao Fogo (250-500°C)	= 0,05 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6) NA
Perda ao Fogo (500-950°C)	= 43,37 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6) NA
Perda ao Fogo	= 43,46 ± 0,19 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6) NA
Óxido de Silício	= 0,97 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Alumínio	= 0,07 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Ferro (III)	= 0,11 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Cálcio Total	= 54,68 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Magnésio	= 0,43 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Trióxido de Enxofre	= 0,00 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Potássio	= 0,05 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Titânio	= 0,02 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Fósforo	= 0,00 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Manganês (II)	= 0,01 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Óxido de Estrôncio	= 0,01 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3) NA
Total	= 99,81 %	Cálculo NA
Análise por Difrração de Raios X	=	Difrração de Raios X NA

Data da realização de ensaios: Início 2010-06-23 Fim 2010-06-25

OBS: A colheita da amostra foi da responsabilidade do cliente.

(NA) Ensaio Não Acreditado.

REN 503 13/D

O Técnico:

O Chefe do LC:

João Pereira

Os resultados deste relatório são apenas válidos para os itens ensaiados

## B.2.3 - Características do resíduo do catalisador exausto de FCC

## Relatório de Ensaio

Laboratório Central  
do Grupo CimporEdifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8  
2689-524 Prior Velho-Portugal  
Tel: 21 940 8600 - Fax: 21 942 2901L0218  
Ensaios

<b>Cliente/Endereço:</b> Laboratório Central do Grupo Cimpor Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8 2689-524 Prior Velho Portugal	<b>Relatório Nº</b>	0198B
	<b>Processo Nº</b>	3557AO
	<b>Material</b>	Pó
	<b>Colheita</b>	2010-06-18
	<b>Entrada</b>	2010-06-21
<b>Proveniência:</b> ISEL	<b>Saída</b>	2010-06-29
		<b>Página</b> 4 / 6

Este relatório não pode ser reproduzido integral ou parcialmente sem a autorização prévia do LC

Ident. da Amostra no Cliente **Zeolito - ISEL** Nº da Amostra **1391D**

Ensaio	Resultado/Média	Método	
Humidade (110°C)	= 0,92 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6)	NA
Perda ao Fogo (110-250°C)	= 0,87 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6)	NA
Perda ao Fogo (250-500°C)	= 0,34 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6)	NA
Perda ao Fogo (500-950°C)	= 0,28 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6)	NA
Perda ao Fogo	= 1,49 ±0,19 %	Análise Termo-Gravimétrica - IOL 105 (edição 6)	
Óxido de Silício	= 39,59 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Alumínio	= 52,81 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Ferro (III)	= 0,55 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Cálcio Total	= 0,09 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Magnésio	= 0,19 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Trióxido de Enxofre	= 0,23 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Potássio	= 0,04 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Sódio	= 0,68 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Titânio	= 0,82 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Fósforo	= 0,06 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Manganês (II)	= 0,00 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Óxido de Estrôncio	= 0,00 %	FRX Pérola - IOL 114 (edição 5) e 115 (edição 3)	NA
Total	= 96,55 %	Cálculo	NA
Análise por Difração de Raios X	=	Difração de Raios X	NA

Data da realização de ensaios: Início 2010-06-23 Fim 2010-06-25

OBS: A colheita da amostra foi da responsabilidade do cliente.

(NA) Ensaio Não Acreditado.

Zeólito (Pó): Outros elementos presentes: La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 1,775 %, ZrO<sub>2</sub> - 0.176%, NiO - 0.309%, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 0.397%, Zn - 0.027%, Cl - 0.085%

REN 503 13/D

O Técnico:

O Chefe do LC:

João Pereira

Os resultados deste relatório são apenas válidos para os itens ensaiados

## B.2.4 - Ensaio da mesa de espalhamento da areia

**Relatório de Ensaio****Laboratório Central  
do Grupo Cimpor**

Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8  
2669-524 Prior Velho-Portugal  
Tel: 21 940 8600 - Fax: 21 942 2901

**IPAC**  
acreditação

L0218  
Ensaios

<b>Cliente/Endereço:</b> Laboratório Central do Grupo Cimpor Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8 2669-524 Prior Velho Portugal	<b>Relatório N°</b>	0198B
	<b>Processo N°</b>	3557AO
	<b>Material</b>	Areia Lavada
	<b>Colheita</b>	2010-06-18
	<b>Entrada</b>	2010-06-21
	<b>Saida</b>	2010-06-29
<b>Proveniência:</b> ISEL		<b>Página</b> 5 / 6

Este relatório não pode ser reproduzido integral ou parcialmente sem a autorização prévia do LC

**Ident. da Amostra no Cliente**  **N° da Amostra**

Ensaio	Resultado/Média	Método
Espalhamento	= 75,7 %	Método Interno NA

Data da realização de ensaios: Início 2010-06-23 Fim 2010-06-25

**OBS:** A colheita da amostra foi da responsabilidade do cliente.

**(NA) Ensaio Não Acreditado.**

REN 503 13/D

**O Técnico:**

**O Chefe do LC:**

João Pereira

Os resultados deste relatório são apenas  
válidos para os itens ensaiados

B.2.5 - Diâmetro do resíduo de pedra natural:**Relatório de Ensaio****Laboratório Central  
do Grupo Cimpor**Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8  
2689-524 Prior Velho-Portugal  
Tel: 21 940 8600 - Fax: 21 942 2901L0218  
Ensaíolos

<b>Cliente/Endereço:</b> Laboratório Central do Grupo Cimpor Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8 2689-524 Prior Velho Portugal	<b>Relatório Nº</b>	0199B
	<b>Processo Nº</b>	3557AO
	<b>Material</b>	Pó
	<b>Colheita</b>	2010-06-18
	<b>Entrada</b>	2010-06-21
<b>Proveniência:</b> ISEL	<b>Saida</b>	2010-06-29
		Página 1 / 5

Este relatório não pode ser reproduzido integral ou parcialmente sem a autorização prévia do LC

Ident. da Amostra no Cliente **Pó de Marmore - ISEL** Nº da Amostra **1389D**

Ensaio	Resultado/Média	Método	
Diâmetro Médio - Granulometria Laser	= 24,37 µm	Laser Cilas Via Húmida - Água	NA

Data da realização de ensaios: Início 2010-06-23 Fim 2010-06-25

**OBS:** A colheita da amostra foi da responsabilidade do cliente.**(NA) Ensaio Não Acreditado.**

REN 503 13/D

**O Técnico:****O Chefe do LC:**

João Pereira

Os resultados deste relatório são apenas válidos para os itens ensaiados

B.2.6 - Diâmetro do resíduo de catalisador exausto de FCC:**Relatório de Ensaio****Laboratório Central  
do Grupo Cimpor**

Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8  
2689-524 Prior Velho-Portugal  
Tel: 21 940 8600 - Fax: 21 942 2901

**Cliente/Endereço:**

Laboratório Central do Grupo Cimpor  
Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8  
2689-524 Prior Velho  
Portugal

**Proveniência:** ISEL

**Relatório N°**

0199B

**Processo N°**

3557AO

**Material**

Pó

**Colheita**

2010-06-18

**Entrada**

2010-06-21

**Saida**

2010-06-29

Página 3 / 5

Este relatório não pode ser reproduzido integral ou parcialmente sem a autorização prévia do LC

**Ident. da Amostra no Cliente**

Zeolito - ISEL

**N° da Amostra**

1391D

Ensaio	Resultado/Média	Método
Diâmetro Médio - Granulometria Laser	= 83,06 µm	Laser Cilas Via Húmida - Água
		NA

Data da realização de ensaios: Início 2010-06-23 Fim 2010-06-25

**OBS:** A colheita da amostra foi da responsabilidade do cliente.

**(NA) Ensaio Não Acreditado.**

Zeólito (Pó): Outros elementos presentes: La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 1,775 %, ZrO<sub>2</sub> - 0.176%, NiO - 0.309%, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 0.397%, Zn - 0.027%, Cl - 0.085%

**O Técnico:**

**O Chefe do LC:**

João Pereira

Os resultados deste relatório são apenas válidos para os itens ensaiados

REN 503 13/D

B.2.7 - Diâmetro do resíduo de catalisador exausto de FCC moído 12 segundos**Relatório de Ensaio****Laboratório Central  
do Grupo Cimpor**

Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8  
2689-524 Prior Velho-Portugal  
Tel: 21 940 8600 - Fax: 21 942 2901



<b>Cliente/Endereço:</b> Laboratório Central do Grupo Cimpor Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8 2689-524 Prior Velho Portugal	<b>Relatório Nº</b>	0199B
	<b>Processo Nº</b>	3557AO
	<b>Material</b>	Pó
	<b>Colheita</b>	2010-06-18
	<b>Entrada</b>	2010-06-25
<b>Saida</b>	2010-06-29	
<b>Proveniência:</b> ISEL		<b>Página</b> 4 / 5

Este relatório não pode ser reproduzido integral ou parcialmente sem a autorização prévia do LC

**Ident. da Amostra no Cliente**  **Nº da Amostra**

Ensaio	Resultado/Média	Método	
Diâmetro Médio - Granulometria Laser	= 20,72 µm	Laser Cilas Via Húmida	NA

Data da realização de ensaios: Início 2010-06-23 Fim 2010-06-25

**OBS:** A colheita da amostra foi da responsabilidade do cliente.

**(NA) Ensaio Não Acreditado.**

REN 503 13/D

**O Técnico:**

**O Chefe do LC:**  
João Pereira

Os resultados deste relatório são apenas válidos para os itens ensaiados

## B.2.8 - Diâmetro do resíduo de catalisador exausto de FCC moído 6 segundos:

**Relatório de Ensaio****Laboratório Central  
do Grupo Cimpor**

Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8  
2689-524 Prior Velho-Portugal  
Tel: 21 940 8600 - Fax: 21 942 2901



<b>Cliente/Endereço:</b> Laboratório Central do Grupo Cimpor Edifício CIMPOR - Av. Severiano Falcão, 8 2689-524 Prior Velho Portugal	<b>Relatório N°</b>	0199B
	<b>Processo N°</b>	3557AO
	<b>Material</b>	Pó
	<b>Colheita</b>	2010-06-18
	<b>Entrada</b>	2010-06-25
	<b>Saida</b>	2010-06-29
<b>Proveniência:</b> ISEL	Página 5 / 5	

Este relatório não pode ser reproduzido integral ou parcialmente sem a autorização prévia do LC

Ident. da Amostra no Cliente **Zeolito N° 1391D - ISEL - Moído 6 s** N° da Amostra **1429D**

Ensaio	Resultado/Média	Método	
Diâmetro Médio - Granulometria Laser	= 31,72 µm	Laser Cilas Via Húmida	NA

Data da realização de ensaios: Início 2010-06-23 Fim 2010-06-25

**OBS:** A colheita da amostra foi da responsabilidade do cliente.

**(NA) Ensaio Não Acreditado.**

REN 503 13/D

**O Técnico:**

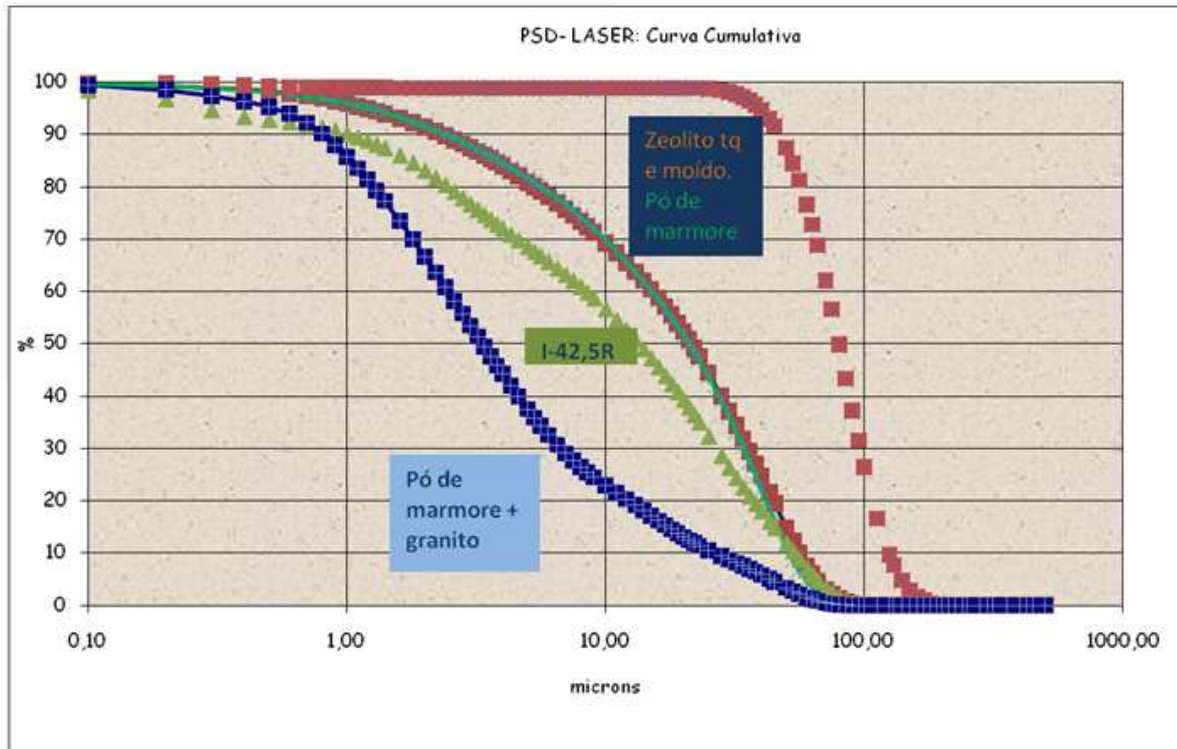
**O Chefe do LC:**  
João Pereira

Os resultados deste relatório são apenas válidos para os itens ensaiados



# ANEXO C

Anexo C - Curva cumulativa de alguns materiais.





## ANEXO D - RESULTADOS INTEGRAIS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS NAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.

### D.1 - Argamassas de cimento, água e areia normalizada

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (mm, %)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio			Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp. (Mpa)	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão (Mpa)	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)
								Flexão	Compressão													
Areia normalizada	2	1	588,03	589,93	205	7,5	1662,5	2,60	44,00	41,50	27,50	25,94	6,09	587,88	1,82	0,31	26,3	1,0	3,8	6,0	1,0	16,8
		2	584,68	586,45				2,10	40,00	42,50	25,00	26,56	4,92									
		3	585,80	587,26				2,95	43,50	40,50	27,19	25,31	6,91									
	7	1	575,26	577,82	82,0%			4,30	59,00	58,50	36,88	36,56	10,08	577,32	0,63	0,11	37,0	0,4	1,0	9,5	1,1	11,6
		2	573,94	576,61				3,40	59,50	59,00	37,19	36,88	7,97									
		3	574,66	577,52				4,10	60,00	60,00	37,50	37,50	9,61									
	28	1	586,38	590,17				4,55	79,00	80,00	49,38	50,00	10,66	590,00	1,21	0,20	50,0	0,4	0,8	10,8	0,6	5,6
		2	584,83	588,72				4,40	81,00	80,00	50,63	50,00	10,31									
		3	586,94	591,12				4,90	80,00	80,00	50,00	50,00	11,48									

### D.2 – Argamassa de cimento, água e areia ensaiada pela CIMPOR

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (mm, %)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio			Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp. (Mpa)	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão (Mpa)	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)						
								Flexão	Compressão																			
Argamassa cimento, areia e água ensaiada pela CIMPOR	2				90,3%												27,2			5,8								
	7																								38,4			6,6
	28																											

PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA REFINAÇÃO DO PETRÓLEO

D.3 - Argamassas de cimento, areia e água (argamassa de referência – Ref.)

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (mm, %)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio Flexão			Ensaio Compressão			Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)		Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp. (Mpa)	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão (Mpa)	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)																				
								3,00	44,00	45,00	27,50	28,13	7,03	27,50	27,50	26,25	27,50										6,56																			
Ref.	2	1	573,27	574,83	187,5	6	1644,8	3,00	44,00	45,00	27,50	28,13	7,03	572,34	2,88	0,50	27,29	0,65	2,37	6,88	0,27	3,94																								
		2	572,54	575,02				2,80	42,00	44,00	26,25	27,50	6,56																																	
		3	572,38	574,39				3,00	44,00	43,00	27,50	26,88	7,03																																	
	7	1	571,77	576,6				75,0%	6	1644,8	3,60	49,00	60,00										30,63	37,50	8,44	575,52	2,47	0,43	37,71	15,45	40,99	8,75	0,29	3,37												
		2	574,25	579,04							3,75	59,00	58,00										36,88	36,25	8,79																					
		3	572,99	577,85							3,85	62,00	63,00										38,75	39,38	9,02																					
	28	1	564,37	570,43							75,0%	6	1644,8										4,00	73,00	74,00										45,63	46,25	9,38	573,87	4,09	0,71	45,73	0,83	1,82	9,84	0,81	8,25
		2	575,02	581,17																			4,60	71,00	73,00										44,38	45,63	10,78									
		3	570,03	576,26																			4,00	75,00	73,00										46,88	45,63	9,38									
Ref.	2	1	569,96	572,97	190	5,4	1652,8							2,85	44,00	44,00	27,50	27,50	6,68	571,93	1,94	0,34	25,83	1,35	5,23										6,91	0,51	7,39									
		2	569,57	573,14										2,80	40,00	39,00	25,00	24,38	6,56																											
		3	565,97	569,69										3,20	40,00	41,00	25,00	25,63	7,50																											
	7	1	571,15	577,07				76,0%	5,4	1652,8				3,75	67,50	57,50	35,94	35,94	8,79							575,74	1,15	0,20	35,73	0,43	1,19	8,61	4,98	57,77												
		2	569,00	575,05										3,60	57,00	56,00	35,63	35,00	8,44																											
		3	569,89	575,09										3,60	57,00	58,00	35,63	36,25	0,00																											
	28	1	572,91	577,70							76,0%	5,4	1652,8	3,90	75,00	74,00	46,88	46,25	9,14																			575,20	2,19	0,38	45,94	0,66	1,43	9,45	0,75	7,97
		2	568,80	573,60										3,80	73,00	73,00	45,63	45,63	8,91																											
		3	569,31	574,30										4,40	72,00	74,00	45,00	46,25	10,31																											
Ref.	2d	1	569,00	572	190	6,6	1648							3,30	45,00	46,00	28,13	28,75	7,73	570,33	3,79	0,66	28,23	0,47	1,67										7,50	0,31	4,13									
		2	569,00	573										3,05	46,00	44,00	28,75	27,50	7,15																											
		3	563,00	566										3,25	45,00	45,00	28,13	28,13	7,62																											
	7d	1	566,00	571				76,0%	6,6	1648				3,90	61,50	56,00	38,44	35,00	9,14							573,00	2,00	0,35	36,35	1,36	3,75	9,26	0,12	1,27												
		2	568,00	573										3,95	59,50	56,50	37,19	35,31	9,26																											
		3	569,00	575,00										4,00	59,00	56,50	36,88	35,31	9,38																											
	28d	1	563,00	568,00							76,0%	6,6	1648	4,80	74,00	76,00	46,25	47,50	11,25																			568,67	1,15	0,20	47,29	1,09	2,31	10,63	1,08	10,19
		2	562,00	568,00										4,80	79,00	75,00	49,38	46,88	11,25																											
		3	564,00	570,00										4,00	75,00	75,00	46,88	46,88	9,38																											
Ref.	28	1	-	574,00	210	5,9	1646,2							3,90	68,00	70,00	42,50	43,75	9,14	575,67	1,53	0,27	43,2	0,5	1,1										9,4	0,2	2,5									
		2	-	577,00										4,10	69,00	69,00	43,13	43,13	9,61																											
		3	-	576,00										4,00	70,00	69,00	43,75	43,13	9,38																											
	56	1	-	583,00				84,0%	5,9	1646,2				3,85	76,00	76,00	47,50	47,50	9,02							584,00	1,00	0,17	47,9	1,2	2,4	11,3	0,7	5,8												
		2	-	584,00										4,80	75,00	79,00	46,88	49,38	11,25																											
		3	-	585,00										5,30	79,00	75,00	49,38	46,88	12,42																											
	90	1	-	582,00							84,0%	5,9	1646,2	4,80	80,00	78,00	50,00	48,75	11,25																			581,00	1,73	0,30	50,7	1,3	2,6	11,6	0,7	5,8
		2	-	579,00										4,80	84,00	81,00	52,50	50,63	11,25																											
		3	-	582,00										5,30	83,00	81,00	51,88	50,63	12,42																											

## D.4 - Argamassas de cimento, areia, água, com introdução de superplastificante (argamassa de referência com SP – Ref\_SP)

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (mm, %)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio			Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp. (Mpa)			σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão (Mpa)			σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)
								Flexão	Compressão	Compressão	Compressão	Compressão					Flexão	Flexão	Flexão							
Ref_SP	2	1	-	582,53	250	4,5	1684,2	3,70	57,00	57,00	35,63	35,63	8,67	583,94	2,18	0,37	35,3	0,5	1,4	8,6	0,1	0,8				
		2	-	586,45				3,65	56,50	57,00	35,31	35,63	8,55													
		3	-	582,84				3,65	56,00	55,00	35,00	34,38	8,55													
	7	1	585,89	586,90				4,35	73,00	71,00	45,63	44,38	10,20	587,21	1,79	0,30	44,8	0,9	2,1	10,2	0,0	0,0				
		2	584,68	585,60				4,35	70,00	70,00	43,75	43,75	10,20													
		3	588,03	589,13				4,35	73,00	73,00	45,63	45,63	10,20													
	28	1	589,09	591,94				5,20	82,00	82,50	51,25	51,56	12,19	595,11	3,56	0,60	51,5	0,5	1,1	11,6	0,6	5,1				
		2	596,09	598,96				4,90	83,50	83,00	52,19	51,88	11,48													
		3	591,26	594,43				4,70	82,00	81,00	51,25	50,63	11,02													
	Ref_SP	2	1	590,00				592,00	250	5,8	1672	4,20	58,00	58,00	36,25	36,25	9,84	591,67	1,53	0,26	36,1	1,0	2,8	9,5	0,3	2,8
			2	587,00				590,00				4,00	56,00	56,00	35,00	35,00	9,38									
			3	589,00				593,00				4,00	60,00	59,00	37,50	36,88	9,38									
7		1	595,00	598,00	4,60	77,00	78,00	48,13				48,75	10,78	598,67	0,58	0,10	48,2	0,7	1,5	11,4	0,6	5,3				
		2	596,00	599,00	5,10	78,00	75,00	48,75				46,88	11,95													
		3	596,00	599,00	4,95	78,00	77,00	48,75				48,13	11,60													
28		1	595,00	599,00	4,55	90,00	90,00	56,25				56,25	10,66	599,00	2,00	0,33	55,1	1,6	3,0	11,1	0,4	3,8				
		2	592,00	597,00	4,80	89,00	83,00	55,63				51,88	11,25													
		3	597,00	601,00	4,90	88,00	89,00	55,00				55,63	11,48													
Ref_SP		28	1	585,00	590,00	250	6,4	1667				4,85	89,00	86,00	55,63	53,75	11,37	589,33	2,08	0,35	53,2	1,4	2,6	11,3	0,1	1,0
			2	582,00	587,00							4,80	83,00	83,00	51,88	51,88	11,25									
			3	585,00	591,00							4,75	85,00	85,00	53,13	53,13	11,13									
	56	1	590,00	596,00	5,10				90,00	90,00	56,25	56,25	11,95	598,33	3,21	0,54	57,3	0,9	1,5	12,0	0,1	1,1				
		2	595,00	602,00	5,20				93,00	92,00	58,13	57,50	12,19													
		3	590,00	597,00	5,10				93,00	92,00	58,13	57,50	11,95													
	90	1	595,00	602,00	5,40				98,00	96,00	61,25	60,00	12,66	601,67	0,58	0,10	60,1	0,6	1,0	12,1	0,6	4,9				
		2	595,00	601,00	5,20				96,00	96,00	60,00	60,00	12,19													
		3	596,00	602,00	4,90				96,00	95,00	60,00	59,38	11,48													

PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA REFINAÇÃO DO PETRÓLEO

D.5 - Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria), com adição de superplastificante

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (cm)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio			Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)		Média massas (g)			Média T.rotura Comp. (Mpa)			Média T.rotura Flexão (Mpa)		
								Flexão	Compressão					σ massas	c. v. massas (%)	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)				
C95_rFCC5_SP	2	1	579,81	582,49	23,2			3,55	54,50	56,00	34,06	35,00	8,32	583,68	1,07	0,18	33,39	0,98	2,93	8,20	0,12	1,43	
		2	580,95	583,99				3,45	52,00	53,00	32,50	33,13	8,09										
		3	581,5	584,57				3,50	52,00	53,00	32,50	33,13	8,20										
	7	1	578,71	582,51	92,80%	4,2	1682,3	3,80	75,00	73,00	46,88	45,63	8,91	586,80	4,03	0,69	46,46	0,65	1,39	9,57	0,58	6,04	
		2	582,7	587,39				4,25	75,00	73,00	46,88	45,63	9,96										
		3	585,71	590,5				4,20	75,00	75,00	46,88	46,88	9,84										
	28	1	579,46	585,9				4,80	86,00	86,00	53,75	53,75	11,25	587,73	1,88	0,32	54,82	0,79	1,45	11,19	0,61	5,45	
		2	583,23	589,4				4,90	87,00	87,00	54,38	54,38	11,48										
		3	580,51	586,5				4,70	86,50	88,50	54,06	55,31	11,02										
C95_rFCC5_SP	28	1	584,04	590,2	22,5			4,45	88,00	88,00	55,00	55,00	10,43										
		2	581,72	588,5				4,60	87,50	89,00	54,69	55,63	10,78										
		3	579,67	585,9				5,20	89,00	90,00	55,63	56,25	12,19										
	56	1	578,39	586	90,00%	5,8	1663,4	4,65	95,00	94,00	59,38	58,75	10,90	589,00	3,00	0,51	59,17	0,85	1,44	11,56	0,65	5,58	
		2	582,25	589				4,95	94,00	93,00	58,75	58,13	11,60										
		3	584,76	592				5,20	97,00	95,00	60,63	59,38	12,19										
	90	1	578,72	586				4,60	97,00	95,00	60,63	59,38	10,78	585,00	1,00	0,17	60,83	0,85	1,40	11,41	0,59	5,17	
		2	578,02	585				4,90	97,00	99,00	60,63	61,88	11,48										
		3	576,63	584				5,10	98,00	98,00	61,25	61,25	11,95										

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prisms na desmoldagem (g)		Mesa de espalhamento (cm)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio			Tensão rotura		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp. (Mpa)	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão (Mpa)	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)																		
			Peso prisms (g)					Flexão	Compressão	compressão (Mpa)	rotura flexão (Mpa)																													
C90_rFCC10_SP	2 dias	1	573,63	577,28	20,5	5,8	-	3,00	49,50	50,00	30,94	31,25	7,03	574,63	2,97	0,52	30,77	0,49	1,58	7,25	0,28	3,89																		
		2	571,02	575,72				3,20	49,50	49,00	30,94	30,63	7,50																											
		3	571,34	576,42				3,05	49,00	48,00	30,63	30,00	7,15																											
	7 dias	1	569,06	576,2				4,00	77,00	77,00	48,13	48,13	9,38										577,42	3,86	0,67	46,82	1,53	3,27	9,01	0,72	8,00									
		2	567,3	574,37				3,30	78,00	77,50	48,75	48,44	7,73																											
		3	565,58	572,01				4,00	79,50	77,00	49,69	48,13	9,38																											
	28 dias	1	571,93	579				4,40	90,00	87,00	56,25	54,38	10,31																			578,19	2,93	0,51	56,20	1,63	2,91	9,80	0,46	4,69
		2	567,55	575				4,30	90,00	88,00	56,25	55,00	10,08																											
		3	566,58	575				4,40	92,50	89,00	57,81	55,63	10,31																											
C90_rFCC10_SP	2 dias	1	568,52	573,19	20,5	5,8	1640,2	3,05	48,00	48,00	30,00	30,00	7,15	574,63	2,97	0,52	30,77	0,49	1,58	7,25	0,28	3,89																		
		2	572,43	577,01				3,20	50,00	50,00	31,25	31,25	7,50																											
		3	571,61	575,33				3,00	48,00	49,50	30,00	30,94	7,03																											
	7 dias	1	577,08	583,9				3,65	77,50	78,00	48,44	48,75	8,55										577,42	3,86	0,67	46,82	1,53	3,27	9,01	0,72	8,00									
		2	571,59	577,64				4,40	75,00	73,00	46,88	45,63	10,31																											
		3	575,62	582,26				4,20	76,00	77,00	47,50	48,13	9,84																											
	28 dias	1	576,67	584				4,00	91,50	91,00	57,19	56,88	9,38																			578,19	2,93	0,51	56,20	1,63	2,91	9,80	0,46	4,69
		2	569,89	578				4,40	89,00	88,00	55,63	55,00	10,31																											
		3	570,41	579				4,15	92,00	89,00	57,50	55,63	9,73																											
C90_rFCC10_SP	2 dias	1	574,66	577,77	20,5	6,4	1632	3,35	50,00	48,00	31,25	30,00	7,85	574,63	2,97	0,52	30,77	0,49	1,58	7,25	0,28	3,89																		
		2	574,02	577,65				2,95	48,50	49,00	30,31	30,63	6,91																											
		3	570,63	574,4				3,00	49,50	50,00	30,94	31,25	7,03																											
	7 dias	1	572,26	578,69				3,45	71,00	72,00	44,38	45,00	8,09										577,42	3,86	0,67	46,82	1,53	3,27	9,01	0,72	8,00									
		2	574,14	580,29				3,80	72,00	74,00	45,00	46,25	8,91																											
		3	574,63	580,5				3,80	75,00	74,00	46,88	46,25	8,91																											
	28 dias	1	569,33	578,7				4,10	91,50	92,00	57,19	57,50	9,61																			578,19	2,93	0,51	56,20	1,63	2,91	9,80	0,46	4,69
		2	569,03	578,3				4,20	93,00	92,50	58,13	57,81	9,84																											
		3	568,04	577,4				3,90	94,00	92,50	58,75	57,81	9,14																											
C90_rFCC10_SP	2 dias	1	565,13	570,93	20	6,4	1630	3,00	50,00	50,00	31,25	31,25	7,03	574,63	2,97	0,52	30,77	0,49	1,58	7,25	0,28	3,89																		
		2	564,17	569,42				3,10	49,00	49,00	30,63	30,63	7,27																											
		3	564,72	570,44				3,20	50,00	50,00	31,25	31,25	7,50																											
	7 dias	1	565,75	573,14				3,80	74,00	72,00	46,25	45,00	8,91										577,42	3,86	0,67	46,82	1,53	3,27	9,01	0,72	8,00									
		2	565,81	572,88				3,70	72,50	74,00	45,31	46,25	8,67																											
		3	570,1	577,16				4,05	72,00	73,00	45,00	45,63	9,49																											
	28 dias	1	566,04	574,3				4,10	84,00	85,00	52,50	53,13	9,61																			578,19	2,93	0,51	56,20	1,63	2,91	9,80	0,46	4,69
		2	564,83	573,9				4,30	88,00	90,00	55,00	56,25	10,08																											
		3	564,93	574,3				3,80	86,00	85,00	53,75	53,13	8,91																											
C90_rFCC10_SP	28d	1	573	578	21	6,3	1646	4,40	92,00	90,00	57,50	56,25	10,31	582,00	1,00	0,17	57,71	1,41	2,44	11,29	0,24	2,16																		
		2	577	583				4,30	91,00	91,00	56,88	56,88	10,08																											
		3	579	585				4,00	93,00	90,00	58,13	56,25	9,38																											
	56	1	569	577				4,70	95,00	90,00	59,38	56,25	11,02										576,00	1,00	0,17	57,71	1,41	2,44	11,29	0,24	2,16									
		2	567	575				4,90	90,00	92,00	56,25	57,50	11,48																											
		3	568	576				4,85	95,00	92,00	59,38	57,50	11,37																											
	90d	1	574	582				4,65	103,00	99,00	64,38	61,88	10,90																			583,00	1,73	0,30	62,08	2,46	3,96	11,05	0,60	5,44
		2	574	582				4,50	96,00	95,00	60,00	59,38	10,55																											
		3	578	585				5,00	98,00	105,00	61,25	65,63	11,72																											

# PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA REFINAÇÃO DO PETRÓLEO

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (cm)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio Flexão			Ensaio Compressão			Tensão rotura compressão (Mpa)			Tensão rotura flexão (Mpa)			Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp.	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)																									
								3,05	41,00	42,00	25,63	26,25	7,15	2,90	42,00	42,00	26,25	26,25	6,80										2,80	42,50	42,50	26,56	26,56	6,56	3,30	68,50	65,00	42,81	40,63	7,73	3,65	66,50	67,00	41,56	41,88	8,55	3,65	73,50	70,00	45,94	43,75	8,55	4,00
C85_rFCC15_SP	2	1	564,62	568,27	18				3,05	41,00	42,00	25,63	26,25	7,15	565,47	2,08	0,37	26,54	0,47	1,77	6,52	0,59	9,07																														
		2	559,23	563,15					2,90	42,00	42,00	26,25	26,25	6,80																																							
		3	563,36	567,4					2,80	42,50	42,50	26,56	26,56	6,56																																							
	7	1	558,18	563,54	72,00%	6,8	1633,1	3,30	68,50	65,00	42,81	40,63	7,73	564,02	3,41	0,60	42,03	1,65	3,91	8,22	0,73	8,90																															
		2	561,09	566,36				3,65	66,50	67,00	41,56	41,88	8,55																																								
		3	563,94	569,23				3,65	73,50	70,00	45,94	43,75	8,55																																								
	28	1	564,56	571,8	4,00	85,50	87,50	53,44	54,69	9,38	563,22	3,00	0,53	52,30	2,95	5,65	9,13	0,80	8,78																																		
		2	565,81	572,7	4,70	85,00	85,00	53,13	53,13	11,02																																											
		3	563,75	570,8	4,30	87,50	88,00	54,69	55,00	10,08																																											
C85_rFCC15_SP	2	1		564	18,5			2,35	42,50	44,00	26,56	27,50	5,51																																								
		2		566				2,65	43,00	43,00	26,88	26,88	6,21																																								
		3		564				2,95	42,00	43,00	26,25	26,88	6,91																																								
	7	1		560	74,00%	6,8	1605	3,25	65,00	68,50	40,63	42,81	7,62																																								
		2		561				4,00	67,00	67,00	41,88	41,88	9,38																																								
		3		564				3,20	64,00	65,00	40,00	40,63	7,50																																								
	28	1		562	3,70	88,50	90,00	55,31	56,25	8,67																																											
		2		562	3,50	86,00	90,00	53,75	56,25	8,20																																											
		3		560	4,10	91,00	87,00	56,88	54,38	9,61																																											
C85_rFCC15_SP	28	1	556,23	564,5	17,5			3,80	79,00	77,00	49,38	48,13	8,91																																								
		2	554,95	563,7				3,85	78,50	78,00	49,06	48,75	9,02																																								
		3	560,89	569,1				3,85	81,00	81,00	50,63	50,63	9,02																																								
	56	1	559,64	569	70,00%	6,4	1614,3	4,00	91,00	87,00	56,88	54,38	9,38	563,00	4,43	0,79	55,10	1,43	2,60	9,12	0,57	6,21																															
		2	555,87	565				4,10	85,00	90,00	53,13	56,25	9,61																																								
		3	557,14	566				3,95	85,00	88,00	53,13	55,00	9,26																																								
	90	1	563,52	572	4,30	97,00	93,00	60,63	58,13	10,08	569,17	1,83	0,32	60,76	1,23	2,03	9,80	0,71	7,28																																		
		2	561,54	570	4,00	97,00	98,00	60,63	61,25	9,38																																											
		3	561,55	570	4,70	96,50	98,00	60,31	61,25	11,02																																											
C85_rFCC15_SP	28	1	-	554	19,5			3,50	86,00	76,00	53,75	47,50	8,20																																								
		2	-	555				3,75	79,00	77,00	49,38	48,13	8,79																																								
		3	-	553				3,70	85,00	80,00	53,13	50,00	8,67																																								
	56	1	-	557	78,00%	5,5	1638	3,25	91,00	86,00	56,88	53,75	7,62																																								
		2	-	560				3,55	90,00	86,00	56,25	53,75	8,32																																								
		3	-	561				4,50	90,00	89,00	56,25	55,63	10,55																																								
	90	1	-	568	4,25	99,00	101,00	61,88	63,13	9,96																																											
		2	-	568	3,85	95,00	97,00	59,38	60,63	9,02																																											
		3	-	567	4,00	97,00	98,00	60,63	61,25	9,38																																											

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prisms na desmoldagem (g)	Peso prisms (g)	Mesa de espalhamento (cm)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio Flexão	Ensaio Compressão		Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp.	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)	
C80_rFCC20_SP	2	1	540,85	548,36	16			1,80	28,00	28,00	17,50	17,50	4,22	543,91	6,81	1,25	18,23	1,97	10,83	4,18	0,59	14,04	
		2	540,35	547,52				1,50	25,00	26,00	15,63	16,25	3,52										
		3	533,62	540,6				1,60	26,00	27,00	16,25	16,88	3,75										
	7	1	517,86	526,32	64,00%	5,6	1593,9	2,90	53,00	51,00	33,13	31,88	6,80	547,65	10,54	1,93	34,51	1,53	4,43	7,03	0,46	6,58	
		2	544,76	553,96				2,75	53,50	55,00	33,44	34,38	6,45										
		3	542,47	551,6				3,00	52,50	53,50	32,81	33,44	7,03										
	28	1	519,07	535,8				1,95	60,00	55,00	37,50	34,38	4,57	553,83	11,60	2,09	46,16	7,01	15,18	8,09	1,76	21,78	
		2	528,28	542,2				2,90	67,00	47,00	41,88	29,38	6,80										
		3	532,43	544,5				3,00	64,00	65,00	40,00	40,63	7,03										
C80_rFCC20_SP	2	1		542	16,3			2,00	35,00	29,00	21,88	18,13	4,69										
		2		533				1,65	30,00	30,00	18,75	18,75	3,87										
		3		552				2,15	33,00	33,00	20,63	20,63	5,04										
	7	1		551	65,20%	6,8	1596	3,35	56,00	58,00	35,00	36,25	7,85										
		2		553				3,00	58,00	57,00	36,25	35,63	7,03										
		3		550				3,00	57,50	57,50	35,94	35,94	7,03										
	28	1		569				3,90	81,50	82,50	50,94	51,56	9,14										
		2		566				3,90	81,00	81,00	50,63	50,63	9,14										
		3		566				4,50	84,00	84,50	52,50	52,81	10,55										
C80_rFCC20_SP	2	1	543,15	552,6	15			3,35	80,00	80,00	50,00	50,00	7,85										
		2	544,79	554				3,90	79,00	78,00	49,38	48,75	9,14										
		3	544,74	554,4				3,65	80,00	80,00	50,00	50,00	8,55										
	7	1	550,09	559	60,00%	5,8	1598,1	3,85	86,00	80,00	53,75	50,00	9,02	558,00	1,73	0,31	51,25	2,59	5,06	9,22	0,44	4,81	
		2	549,24	559				3,80	86,00	85,00	53,75	53,13	8,91										
		3	545,88	556				4,15	78,00	77,00	48,75	48,13	9,73										
	28	1	549,93	560				3,50	82,00	82,00	51,25	51,25	8,20	558,67	1,53	0,27	51,88	2,85	5,49	7,97	0,41	5,09	
		2	546,53	557				3,20	79,00	78,00	49,38	48,75	7,50										
		3	549,38	559				3,50	88,00	89,00	55,00	55,63	8,20										

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prisms na desmoldagem (g)	Peso prisms (g)	Mesa de espalhamento (cm)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio Flexão	Ensaio Compressão		Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp.	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)
C75_rFCC25_SP	2	1	484,08	496,89	13,5			0,10	12,00	10,00	7,50	6,25	0,23	498,51	1,59	0,32	6,88	0,66	9,53	250,05	351,38	140,52
		2	486,62	498,58				0,15	10,50	10,00	6,56	6,25	0,35									
		3	488,75	500,07				0,20	11,00	12,50	6,88	7,81	0,47									
	7	1	526,16	538,61	54,00%	5,5	1558,4	1,90	37,50	42,00	23,44	26,25	4,45	532,22	6,07	1,14	16,51	6,63	40,14	269,15	372,04	138,23
		2	517,16	531,52				1,60	20,00	23,00	12,50	14,38	3,75									
		3	513,15	526,53				1,10	19,00	17,00	11,88	10,63	2,58									
	28	1	495,83	520,5				1,20	20,00	20,00	12,50	12,50	2,81	526,27	7,17	1,36	12,71	1,29	10,16	266,72	367,05	137,62
		2	504,3	524				1,35	22,00	17,00	13,75	10,63	3,16									
		3	519,51	534,3				2,00	20,00	23,00	12,50	14,38	4,69									

## PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA REFINAÇÃO DO PETRÓLEO

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (cm)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio Flexão			Ensaio Compressão		Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp.	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)
								0,03	0,05	0,05	3,00	3,00	3,00	1,88	1,88									
C70_rFCC30_SP	2	1	451	476	11,5	12,8	1368	0,03	3,00	3,00	1,88	1,88	0,07	474,67	3,21	0,68	2,08	0,32	15,49	0,10	0,03	26,65		
		2	442	471				0,05	4,00	3,00	2,50	1,88	0,12											
		3	447	477				0,05	3,00	4,00	1,88	2,50	0,12											
	7	1	457	494				0,10	8,00	8,00	5,00	5,00	0,23											
		2	449	490				0,10	8,00	8,00	5,00	5,00	0,23											
		3	441	486				0,10	7,00	8,00	4,38	5,00	0,23											
	28	1	511	532				1,50	22,00	21,00	13,75	13,13	3,52											
		2	502	532				1,30	22,00	20,00	13,75	12,50	3,05											
		3	509	528				1,30	21,50	18,00	13,44	11,25	3,05											
C70_rFCC30_SP	28	1	480	480	12	12,8	-	0,50	10,00	8,00	6,25	5,00	1,17	500,67	6,66	1,33	6,15	0,73	11,89	1,56	0,14	8,66		
		2	483	0,35				10,00	7,00	6,25	4,38	0,82												
		3	473	0,30				5,00	6,00	3,13	3,75	0,70												
	56	1	508	508				0,70	11,00	10,00	6,88	6,25	1,64											
		2	499	499				0,70	11,00	9,00	6,88	5,63	1,64											
		3	495	495				0,60	10,00	8,00	6,25	5,00	1,41											
	90	1	-	-				0,80	11,00	11,00	6,88	6,88	1,88											
		2	-	-				0,70	10,00	12,00	6,25	7,50	1,64											
		3	-	-				0,80	12,00	12,00	7,50	7,50	1,88											

### D.6 - Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC (moído), com adição de superplastificante

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (cm)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio Flexão			Ensaio Compressão		Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp.	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)
								3,75	4,00	3,90	58,00	56,00	57,00	36,25	35,00									
C95_rFCCm5_SP	2	1	587	589	250	5,2	1653	3,75	58,00	56,00	36,25	35,00	8,79	590,00	2,65	0,45	35,68	0,57	1,61	9,10	0,29	3,24		
		2	586	588				4,00	57,50	56,00	35,94	35,00	9,38											
		3	591	593				3,90	58,00	57,00	36,25	35,63	9,14											
	7	1	576	580				4,75	74,00	75,00	46,25	46,88	11,13											
		2	580	584				4,40	74,00	75,00	46,25	46,88	10,31											
		3	580	584				4,90	77,00	77,00	48,13	48,13	11,48											
	28	1	582	588				4,85	94,00	95,00	58,75	59,38	11,37											
		2	587	592				4,70	93,00	94,00	58,13	58,75	11,02											
		3	586	591				5,00	90,00	95,00	56,25	59,38	11,72											
C95_rFCCm5_SP	28	1	-	580	227,5	5,3	1657	4,90	85,00	86,00	53,13	53,75	11,48	592,00	1,00	0,17	58,54	2,46	4,20	11,88	0,27	2,28		
		2	-	586				4,70	89,00	87,00	55,63	54,38	11,02											
		3	-	594				4,95	92,50	93,00	57,81	58,13	11,60											
	56	1	-	592				5,00	91,00	88,00	56,88	55,00	11,72											
		2	-	591				5,20	93,00	94,00	58,13	58,75	12,19											
		3	-	593				5,00	98,00	98,00	61,25	61,25	11,72											
	90	1	-	593				5,70	95,00	98,00	59,38	61,25	13,36											
		2	-	593				5,50	98,00	101,00	61,25	63,13	12,89											
		3	-	589				4,50	98,00	100,00	61,25	62,50	10,55											

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (mm. %)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio Flexão	Ensaio Compressão			Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	$\sigma$ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp.	$\sigma$ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão	$\sigma$ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)
C95_rFCCm30_SP	2	1	445	466	130			0,05	3,00	4,00	1,88	2,50	0,12	463,00	4,36	0,94	2,29	0,76	33,03	0,16	0,07	43,30	
		2	437	458				0,05	3,00	3,00	1,88	1,88	0,12										
		3	447	465				0,10	6,00	3,00	3,75	1,88	0,23										
	7	1	484	509	52,0%	5,8	1590	1,00	21,50	10,00	13,44	6,25	2,34	497,00	10,82	2,18	7,34	3,12	42,53	1,48	0,75	50,76	
		2	455	488				0,50	10,00	7,00	6,25	4,38	1,17										
		3	461	494				0,40	11,00	11,00	6,88	6,88	0,94										
	28	1	483	509	52,0%	5,8	1590	1,20	19,00	13,00	11,88	8,13	2,81	487,83	22,34	4,58	7,60	2,83	37,23	1,89	1,14	60,28	
		2	478	507				1,40	19,00	10,00	11,88	6,25	3,28										
		3	481	508				1,00	16,00	17,00	10,00	10,63	2,34										
C95_rFCCm30_SP	28	1	469	469	130			0,75	10,00	8,00	6,25	5,00	1,76										
		2	462	462				0,15	11,00	6,00	6,88	3,75	0,35										
		3	472	472				0,35	8,00	9,00	5,00	5,63	0,82										
	56	1	484	484	52,0%	9	1541	0,70	9,00	10,00	5,63	6,25	1,64	467,67	5,13	1,10	6,46	1,41	21,78	1,80	0,14	7,53	
		2	481	481				0,80	9,00	8,00	5,63	5,00	1,88										
		3	494	494				0,80	12,00	14,00	7,50	8,75	1,88										
	90	1			52,0%	9	1541	0,80	10,00	11,00	6,25	6,88	1,88										
		2						0,80	12,00	10,00	7,50	6,25	1,88										
		3						0,80	11,00	13,00	6,88	8,13	1,88										

PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA REFINAÇÃO DO PETRÓLEO

D.7 - Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria) e de resíduo de pedra natural, sem adição de superplastificante

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (mm, %)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio			Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T. rotura Comp. (Mpa)			σ T. rotura Comp.	c. v. T. rotura Comp. (%)	Média T. rotura Flexão (Mpa)			σ T. rotura Flexão	c. v. T. rotura Flexão (%)
								Flexão	Compressão																	
C80_ (rFCC,rPN)20	2	1	547,00	554,00	173	7,2	1630,2	1,50	31,00	31,00	19,38	19,38	3,52	554,33	0,58	0,10	19,9	0,5	2,4	4,3	0,8	18,9				
		2	548,00	555,00				1,85	32,00	32,00	20,00	20,00	4,34													
		3	548,00	554,00				2,20	33,00	32,00	20,63	20,00	5,16													
	7	1	555,00	563,00				3,00	51,00	55,00	31,88	34,38	7,03													
		2	559,00	568,00				2,75	52,00	56,00	32,50	35,00	6,45													
		3	556,00	565,00				3,15	53,00	55,00	33,13	34,38	7,38													
	28	1	556,00	565,00				4,00	67,00	66,00	41,88	41,25	9,38													
		2	560,00	568,00				4,80	70,00	72,00	43,75	45,00	11,25													
		3	557,00	564,00				4,00	69,00	70,00	43,13	43,75	9,38													
C75_ (rFCC,rPN)25	2	1	-	535,00	180	9,0	1560,0	1,00	20,00	20,00	12,50	12,50	2,34	536,00	1,00	0,19	12,5	0,0	0,0	2,7	0,3	12,4				
		2	-	537,00				1,25	20,00	20,00	12,50	12,50	2,93													
		3	-	536,00				1,25	20,00	20,00	12,50	12,50	2,93													
	7	1	-	545,00				2,70	40,00	40,00	25,00	25,00	6,33													
		2	-	548,00				0,00	40,00	39,00	25,00	24,38	0,00													
		3	-	547,00				2,70	39,00	39,00	24,38	24,38	6,33													
	28	1	-	541,00				3,25	56,00	56,00	35,00	35,00	7,62													
		2	-	545,00				3,20	55,00	55,00	34,38	34,38	7,50													
		3	-	544,00				3,40	55,00	55,00	34,38	34,38	7,97													
C70_ (rFCC,rPN)30	2	1	555,00	562,00	160	6,7	1600,0	1,50	28,00	28,00	17,50	17,50	3,52	2,50	0,71	28,28	17,4	0,5	2,7	3,4	0,7	21,3				
		2	557,00	564,00				1,70	28,00	27,00	17,50	16,88	3,98													
		3	560,00	566,00				1,10	27,00	29,00	16,88	18,13	2,58													
	7	1	556,00	564,00				2,75	45,00	44,00	28,13	27,50	6,45													
		2	558,00	565,00				2,80	43,00	47,00	26,88	29,38	6,56													
		3	559,00	566,00				2,80	43,00	50,00	26,88	31,25	6,56													
	28	1	553,00	561,00				3,50	62,00	59,00	38,75	36,88	8,20													
		2	554,00	563,00				3,20	59,00	56,00	36,88	35,00	7,50													
		3	556,00	567,00				3,50	55,00	58,00	34,38	36,25	8,20													

**D.8 - Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de fcc (moído) e de resíduo de pedra natural, sem adição de superplastificante**

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (mm, %)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio			Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)		Média massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	Média T.rotura Comp. (Mpa)			σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	Média T.rotura Flexão (Mpa)			σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)													
								Flexão	Compressão																															
C80_ (rFCCm,rPN)20	2	1		568,00	78,0%	8,0	1618,2	2,25	32,00	32,00	20,00	20,00	5,27	565,00	2,65	0,47	19,8	0,3	1,3	5,2	0,4	8,2																		
		2		564,00				2,35	31,00	31,50	19,38	19,69	5,51																											
		3		563,00				2,00	32,00	32,00	20,00	20,00	4,69																											
	7	1		563,00				3,50	55,00	55,00	34,38	34,38	8,20										563,33	1,53	0,27	34,5	0,6	1,8	8,0	0,2	2,9									
		2		562,00				3,40	57,00	54,00	35,63	33,75	7,97																											
		3		565,00				3,30	55,00	55,00	34,38	34,38	7,73																											
	28	1		560,00				4,30	74,00	71,00	46,25	44,38	10,08																			561,00	1,73	0,31	45,6	0,8	1,8	10,0	0,6	5,9
		2		560,00				4,00	73,00	72,00	45,63	45,00	9,38																											
		3		563,00				4,50	73,00	74,50	45,63	46,56	10,55																											
C75_ (rFCCm,rPN)25	2	1		549,00	72,0%	7,6	1572,0	1,45	24,00	23,00	15,00	14,38	3,40	549,00	1,00	0,18	14,7	0,3	2,1	3,6	0,2	5,0																		
		2		548,00				1,50	24,00	24,00	15,00	15,00	3,52																											
		3		550,00				1,60	23,00	23,50	14,38	14,69	3,75																											
	7	1		558,00				3,10	47,00	47,00	29,38	29,38	7,27										556,67	1,53	0,27	29,3	0,7	2,5	7,6	0,3	4,1									
		2		557,00				3,35	45,00	48,00	28,13	30,00	7,85																											
		3		555,00				3,30	46,00	48,00	28,75	30,00	7,73																											
	28	1		546,00				3,25	67,00	66,00	41,88	41,25	7,62																			548,67	3,06	0,56	41,4	0,6	1,5	8,6	0,9	10,5
		2		548,00				3,80	65,00	67,00	40,63	41,88	8,91																											
		3		552,00				4,00	67,00	65,00	41,88	40,63	9,38																											
C70_ (rFCCm,rPN)30	2	1		545,00	74,0%	8,4	1590,0	1,50	19,00	20,00	11,88	12,50	3,52	543,67	3,21	0,59	12,4	0,3	2,1	3,4	0,3	8,1																		
		2		546,00				1,50	20,00	20,00	12,50	12,50	3,52																											
		3		540,00				1,30	20,00	20,00	12,50	12,50	3,05																											
	7	1		549,00				2,90	45,00	48,00	28,13	30,00	6,80										549,33	1,53	0,28	29,3	0,7	2,5	6,6	0,2	3,6									
		2		551,00				2,80	47,00	46,00	29,38	28,75	6,56																											
		3		548,00				2,70	48,00	47,00	30,00	29,38	6,33																											
	28	1		555,00				3,50	68,00	67,00	42,50	41,88	8,20																			554,00	1,00	0,18	41,8	0,9	2,2	8,9	1,0	11,1
		2		554,00				3,65	66,00	65,00	41,25	40,63	8,55																											
		3		553,00				4,30	66,00	69,00	41,25	43,13	10,08																											

PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA REFINAÇÃO DO PETRÓLEO

D.9 - Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC (tal como foi recebido da refinaria) e de resíduo de pedra natural, com adição de superplastificante

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (mm, %)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio			Tensão rotura			Média			Média			Média																										
								Ensaio Flexão	Ensaio Compressão		Tensão rotura compressão (Mpa)		Tensão rotura flexão (Mpa)	massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	T. rotura Comp. (Mpa)	σ T. rotura Comp.	c. v. T. rotura Comp. (%)	T. rotura Flexão (Mpa)	σ T. rotura Flexão	c. v. T. rotura Flexão (%)																								
C80_ (rFCC,rPN)20_SP	2	1		591,00	243	4,7	1670,0	4,10			0,00	0,00	9,61	588,33	3,06	0,52	23,1	9,1	0,5	5,1																										
		2		589,00				3,70		37,00	0,00	23,13	8,67																																	
		3		585,00				3,90		0,00	0,00	9,14																																		
	7	1		591,00				97,2%	4,7	1670,0	4,05	65,00	65,50								40,63	40,94	9,49	588,67	2,52	0,43	41,4	0,6	1,6	10,0	0,5	4,7														
		2		589,00							4,45	67,00	65,50								41,88	40,94	10,43																							
		3		586,00							4,25	67,00	67,50								41,88	42,19	9,96																							
	28	1		598,00							97,2%	4,7	1670,0								4,95	86,00	86,00										53,75	53,75	11,60	597,67	1,53	0,26	53,3	0,3	0,6	12,0	0,4	3,4		
		2		596,00																	5,10	85,00	85,00										53,13	53,13	11,95											
		3		599,00																	5,30	85,00	85,00										53,13	53,13	12,42											
C75_ (rFCC,rPN)25_SP	2	1	585,00	586,00	242	4,3	1660,0							2,70	40,00	41,00	25,00	25,63	6,33	585,00	3,61	0,62	25,2										0,3	1,3	6,7										0,5	7,3
		2	585,00	2,80										40,00	41,00	25,00	25,63	6,56																												
		3	578,00	3,10										40,00	40,00	25,00	25,00	7,27																												
	7	1	583,00	588,00				96,8%	4,3	1660,0				3,90	63,50	64,00	39,69	40,00	9,14					587,33	1,15	0,20	39,4	0,5	1,2	9,2	0,1	1,5														
		2	581,00	4,00										62,00	62,50	38,75	39,06	9,38																												
		3	583,00	3,90										63,50	62,50	39,69	39,06	9,14																												
	28	1	580,00	585,00							96,8%	4,3	1660,0	4,30	81,00	81,00	50,63	50,63	10,08																	587,67	2,52	0,43	50,7	0,6	1,2	10,7	0,6	5,5		
		2	583,00	4,80										81,00	80,00	50,63	50,00	11,25																												
		3	590,00	4,55										83,00	81,00	51,88	50,63	10,66																												
C70_ (rFCC,rPN)30_SP	2	1		576,00	230	5,8	1641,0							2,15	32,00	32,00	20,00	20,00	5,04	2,50	0,71	28,28	19,9										0,5	2,4	5,1										0,1	1,3
		2		578,00										2,20	31,00	31,00	19,38	19,38	5,16																											
		3		579,00										2,20	33,00	32,00	20,63	20,00	5,16																											
	7	1		585,00				92,0%	5,8	1641,0				3,35	59,00	57,00	36,88	35,63	7,85					2,50	0,71	28,28	35,5	0,7	2,1	8,2	0,4	4,3														
		2		585,00										3,65	57,00	56,00	35,63	35,00	8,55																											
		3		584,00										3,55	56,00	56,00	35,00	35,00	8,32																											
	28	1		581,00							92,0%	5,8	1641,0	4,10	74,00	74,00	46,25	46,25	9,61																	2,50	0,71	28,28	46,3	0,7	1,5	9,9	0,4	3,8		
		2		580,00										4,15	72,00	74,00	45,00	46,25	9,73																											
		3		583,00										4,40	75,00	75,00	46,88	46,88	10,31																											

**D.10 - Argamassas com incorporação de resíduo de catalisador exausto de FCC (moído) e de resíduo de pedra natural, com adição de superplastificante**

Amassaduras	Idade (dias)	Provetes	Peso prismas na desmoldagem (g)	Peso prismas (g)	Mesa de espalhamento (mm, %)	Aerômetro (%)	Peso argamassa (g)	Ensaio			Tensão rotura			Média			Média			Média		
								Flexão	Compressão	Compressão	compressão (Mpa)	rotura flexão (Mpa)	massas (g)	σ massas	c. v. massas (%)	T.rotura Comp. (Mpa)	σ T.rotura Comp.	c. v. T.rotura Comp. (%)	T.rotura Flexão (Mpa)	σ T.rotura Flexão	c. v. T.rotura Flexão (%)	
C80_ (rFCCm,rPN)20_SP	2	1	575,00	579,00	233			3,05	45,50	45,00	28,44	28,13	7,15	577,67	1,53	0,26	28,4	0,6	2,2	6,9	0,3	4,5
		2	572,00	576,00				2,80	44,00	45,50	27,50	28,44	6,56									
		3	574,00	578,00				3,00	47,00	46,00	29,38	28,75	7,03									
	7	1	572,00	578,00	93,2%	6,5	1645,2	3,90	67,00	68,00	41,88	42,50	9,14	582,00	4,00	0,69	42,1	0,7	1,7	10,0	0,8	8,2
		2	577,00	582,00				4,25	66,00	66,50	41,25	41,56	9,96									
		3	580,00	586,00				4,60	69,00	68,00	43,13	42,50	10,78									
	28	1	584,00	589,00				4,80	91,00	91,00	56,88	56,88	11,25	590,67	2,08	0,35	57,4	0,9	1,6	12,3	0,9	7,2
		2	587,00	593,00				5,50	93,00	90,00	58,13	56,25	12,89									
		3	584,00	590,00				5,40	92,00	94,00	57,50	58,75	12,66									
C75_ (rFCCm,rPN)25_SP	2	1		577,00	250			2,90	41,50	42,50	25,94	26,56	6,80	575,67	1,53	0,27	25,9	0,4	1,4	6,8	0,2	3,4
		2		576,00				2,80	41,00	41,00	25,63	25,63	6,56									
		3		574,00				3,00	41,00	41,50	25,63	25,94	7,03									
	7	1		590,00	100,0%	4,8	1654,0	4,70	67,00	67,00	41,88	41,88	11,02	589,67	0,58	0,10	41,6	0,8	1,8	10,6	0,7	7,0
		2		590,00				4,15	67,00	65,00	41,88	40,63	9,73									
		3		589,00				4,70	68,00	65,00	42,50	40,63	11,02									
	28	1		580,00				5,55	90,00	88,00	56,25	55,00	13,01	582,33	2,08	0,36	54,7	1,2	2,1	12,4	0,6	5,2
		2		584,00				5,00	89,00	86,00	55,63	53,75	11,72									
		3		583,00				5,30	85,00	87,00	53,13	54,38	12,42									
C70_ (rFCCm,rPN)30_SP	2	1	569,00	573,00	230			2,55	36,00	37,00	22,50	23,13	5,98	571,00	1,73	0,30	22,5	0,4	1,8	6,0	0,1	2,0
		2	567,00	570,00				2,60	36,00	36,00	22,50	22,50	6,09									
		3	566,00	570,00				2,50	35,00	36,00	21,88	22,50	5,86									
	7	1	573,00	578,00	92,0%	5,2	1641,0	3,80	59,00	60,00	36,88	37,50	8,91	579,33	1,15	0,20	37,9	0,6	1,6	9,5	0,7	7,5
		2	575,00	580,00				4,00	61,00	61,00	38,13	38,13	9,38									
		3	574,00	580,00				4,40	61,50	61,50	38,44	38,44	10,31									
	28	1	578,00	583,00				5,15	85,00	85,00	53,13	53,13	12,07	587,00	3,61	0,61	53,5	1,2	2,2	12,7	0,8	6,3
		2	582,00	588,00				5,80	88,00	84,00	55,00	52,50	13,59									
		3	584,00	590,00				5,30	88,00	84,00	55,00	52,50	12,42									