



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**

**Aplicação do plano fatorial para o estudo de  
betão auto-compactável com incorporação  
de resíduo da Indústria Petrolífera**

**MARCO DERIVALDO DE FREITAS PRATA**

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

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

Orientadoras:

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa (ISEL-ADEC)  
Doutora, Sandra da Conceição Barbosa Nunes (FEUP-CONSTRUCT)

Júri:

Presidente:

Doutor, Luciano Alberto do Carmo Jacinto (ISEL-ADEC)

Vogais:

Doutora, Sandra da Conceição Barbosa Nunes (FEUP-CONSTRUCT)  
Doutor, Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva (ISEL-ADEC)

**Junho de 2017**





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**

**Aplicação do plano fatorial para o estudo de  
betão auto-compactável com incorporação  
de resíduo da Indústria Petrolífera**

**MARCO DERIVALDO DE FREITAS PRATA**

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

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

Orientadoras:

Doutora, Carla Maria Duarte da Silva e Costa (ISEL-ADEC)

Doutora, Sandra da Conceição Barbosa Nunes (FEUP- CONSTRUCT)

Júri:

Presidente:

Doutor, Luciano Alberto do Carmo Jacinto (ISEL-ADEC)

Vogais:

Doutora, Sandra da Conceição Barbosa Nunes (FEUP- CONSTRUCT)

Doutor, Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva (ISEL-ADEC)

**Junho de 2017**



## RESUMO

O presente trabalho final de mestrado na opção de dissertação, teve como propósito a aplicação de um plano fatorial de experiências para o estudo de betão auto-compactável (BAC) com incorporação de resíduo gerado na refinaria de Sines em Portugal, através da substituição parcial de cimento, revelando que se traduz em bons desempenhos tanto em argamassas como em betões e que asseguram a auto-compactabilidade conforme a norma NP EN 206-9.

A reutilização deste resíduo permite a Indústria da Construção, na produção de materiais à base de cimento efetuar poupanças em recursos, diminuindo o consumo de matérias primas e conseqüentemente reduzir a emissão de poluentes atmosféricos. Por outro lado, a Indústria Petrolífera alcança estes objetivos porque reduz a quantidade de resíduo a tratar em aterros sanitários. Deste modo são alcançados dois dos objetivos da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas sobre o desenvolvimento sustentável.

O estudo da composição de BAC é um processo que é feito utilizando métodos e resultados de outros trabalhos da mesma natureza e área de investigação, que consiste em efetuar numa primeira fase a otimização da composição de argamassas utilizando parâmetros da composição como variáveis experimentais e que permitem a viabilidade da produção de betões com os mesmos parâmetros numa fase posterior. O método utilizado para a definição da composição do betão foi o plano fatorial de experiências onde é possível estudar o efeito dos parâmetros da composição  $V_g/V_{g,lim}$  e  $V_s/V_m$  nas diferentes propriedades de BAC. No entanto neste TFM não se efetuou o ajuste dos modelos numéricos.

As propriedades dos betões no estado fresco foram avaliadas através do ensaio de espalhamento (Slump), ensaio de fluidez (Funil V), ensaio de capacidade de passagem (Caixa L). E no estado endurecido através do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons e ensaios de resistência mecânica. Estas propriedades foram avaliadas à luz das especificações requeridas pelas normas europeias em vigor e por procedimentos comumente utilizados na avaliação de BAC.

**Palavras chave:** *betão auto-compactável; resíduo da indústria petrolífera; plano fatorial; velocidade de propagação de ultrassons; sustentabilidade*



## ABSTRACT

This dissertation presents the final work of master that had as its purpose the implementation of the statistical design of experiments approach in self-compacting concrete (SCC) study with incorporation of a waste generated by the oil refinery at Sines in Portugal. Through the partial replacement of cement this composition leads to good performances, both in mortars and concretes, and achieve adequate self-compactability in compliance with European Standard EN 206-9.

The reuse of this waste allows the construction industry in cement based materials production to make savings in resources and thus reduce the consumption of raw materials and therefore reduce the emission of air pollutants. On the other hand, the Oil Industry achieves these goals by reducing the amount to treat of this waste in landfills. With these actions two of the goals of 2030 Agenda for sustainable development of United Nations are achieved.

The study of SCC composition is a process and is performed using methods and results from other studies of the same nature and area of research which consists in: at first stage, to optimize the composition of mortars using mixture parameters and experimental variables that allow the viability of producing concrete at an advanced stage with the same parameters. Statistical design of experiments approach was used to define the composition which allows to study the effect of the composition parameters  $V_g/V_{g,lim}$  and  $V_s/v_m$  on different SCC properties. However in this dissertation the numerical models were not adjusted.

Evaluation of the properties of concrete in fresh-state were conducted by means of slump flow, V-funnel and L-box tests. Ultrasonic pulse velocity and compressive strength tests were conducted to characterize concrete mixtures in the hardened. These were carried out according to the specifications required by European Standards and procedures commonly used in the evaluation of SCC.

**Keywords:** *self-compacting concrete; oil industry waste; statistical factorial design; ultrasonic pulse velocity; sustainability*



## AGRADECIMENTOS

Quero aqui expressar os meus agradecimentos em especial à orientação prestada pela Professora Doutora Carla Maria Duarte da Silva e Costa e a Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes, seleção do tema, apoio durante toda a campanha experimental e pela disponibilidade em garantir as condições necessárias para a realização deste trabalho.

O apoio prestado pelo Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do ISEL através dos técnicos António Fernandes no início da campanha experimental e posteriormente ao Paulo Martins. Agradecer também a disponibilidade para ajuda técnica prestada pelo Professor Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva. Aos meus companheiros de turma e em especial os do laboratório: João Gonçalves, Daniel Bravo, Andreia Pinto e Dino Ferreira. Agradecer aos meus camaradas e “tropas de choque”: Pedro Costa, Márcio Capita e Gilberto Tavares.

As diversas instituições que tornaram este trabalho possível através dos materiais, equipamentos e ajuda técnica: à Fundação FCT no âmbito do projeto Eco Zement, Teixeira Duarte através da Eng.<sup>a</sup> Ana Chaves, Sika através da Rute Silva, Grupo Metal através do Sr. Rui Dias, Ciarga através do Eng.<sup>o</sup> José Costa e a todos os colaboradores do SAS IPL.

Aos meus familiares e amigos em especial ao Rodolfo e a tia Martinha pela disponibilidade e acompanhamento, não existem palavras para expressar a minha gratidão. Agradecer a todos os que contribuíram direta ou indiretamente...

Este trabalho é dedicado à memória da minha querida mamã, Josefa Fernandes da Rosa Freitas, obrigado pela educação, amor e carinho. “*Deus proverá*” eram as tuas palavras de conforto diante das dificuldades e obstáculos pelos quais passamos juntos. Sou grato e tenho muito orgulho por ser teu filho, porque aprendi contigo a manter sempre a dignidade, como a tia Martinha diz “*Trabalha e não dá confiança*” e o primeiro Presidente angolano, Doutor António Agostinho Neto “*A luta continua! A vitória é certa!*”. Beijinhos meu doce mel.

Agradeço à Deus pela força, fé e foco...

Obrigado



## ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	i
ABSTRACT .....	iii
AGRADECIMENTOS.....	v
ÍNDICE GERAL .....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e justificação do tema.....	1
1.2 Objetivos e metodologia .....	2
1.3 Estrutura do TFM.....	4
2 SÍNTESE DE CONHECIMENTOS .....	5
2.1 Considerações iniciais .....	5
2.2 Contributo do BAC para o desenvolvimento sustentável .....	6
2.3 Materiais constituintes do betão auto-compactável.....	9
2.3.1 Materiais finos .....	10
2.3.2 Agregados .....	13
2.3.3 Adjuvantes.....	14
2.3.4 Água.....	14
2.4 Métodos de definição da composição de um BAC.....	15
2.4.1 Métodos orientais .....	16
2.4.2 Métodos ocidentais.....	16
2.4.3 Abordagem estatística baseada em planos fatoriais.....	18
3 ESTUDO DAS ARGAMASSAS .....	21
3.1 Considerações iniciais .....	21
3.2 Composição das argamassas.....	23

3.3	Materiais.....	25
3.3.1	Materiais finos .....	25
3.3.2	Agregados para argamassas.....	26
3.3.3	Superplastificante .....	27
3.3.4	Água.....	27
3.4	Preparação e ensaio das argamassas.....	27
3.4.1	Procedimento de mistura para argamassas.....	27
3.4.2	Ensaio no estado fresco.....	29
3.4.3	Moldagem, desmoldagem e condicionamento de amostras de argamassa 31	
3.4.4	Ensaio no estado endurecido.....	32
3.5	Resultados dos ensaios em argamassas.....	39
3.5.1	Ensaio no estado fresco.....	39
3.5.2	Ensaio no estado endurecido.....	40
3.6	Validação do modelo experimental.....	43
4	ESTUDO DOS BETÕES.....	45
4.1	Considerações iniciais .....	45
4.2	Composições dos betões.....	47
4.2.1	Plano de ensaios ao nível do betão .....	49
4.3	Materiais.....	51
4.3.1	Agregados para betões .....	51
4.4	Preparação e ensaios dos betões.....	54
4.4.1	Procedimento de amassadura .....	54
4.4.2	Ensaio no estado fresco.....	55
4.4.3	Moldagem, desmoldagem e condicionamento de amostras de betão....	58
4.4.4	Ensaio no estado endurecido.....	59
4.5	Resultados dos ensaios no betão .....	61
4.5.1	Ensaio no estado fresco.....	62

4.5.2	Ensaio no estado endurecido.....	68
4.5.3	Ajuste de modelos numéricos e otimização das misturas .....	74
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	75
5.1	Considerações iniciais .....	75
5.2	Conclusões.....	76
5.3	Proposta para trabalhos futuros.....	79
	BIBLIOGRAFIA.....	81
	ANEXOS.....	87
	Anexo A - Calendário da campanha experimental .....	i
	Anexo B – Fichas técnicas dos materiais .....	
	Anexo C – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido das argamassas .	
	Anexo D – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido dos betões.....	



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Evolução temporal de marcos sobre o estado do BAC entre 1980-2016 ..	8
Tabela 3-1 - Atividades de ensaios do programa experimental para argamassas.....	22
Tabela 3-2 - Parâmetros de composição da mistura otimizada e resultados das propriedades previstos pelos modelos [20].....	23
Tabela 3-3 - Identificação dos parâmetros da composição das argamassas .....	24
Tabela 3-4 – Composição das argamassas em kg/m <sup>3</sup> .....	24
Tabela 3-5 – Composição química e propriedades físicas do Cimento Portland, Fíler calcário e Resíduo de FCC [20].....	26
Tabela 3-6 - Comparação dos resultados das argamassas centrais.....	43
Tabela 3-7 - Comparação dos resultados obtidos das argamassas otimizadas com os resultados previstos pelo modelo experimental [20].....	44
Tabela 4-1 - Atividades e ensaios do programa experimental para betões .....	46
Tabela 4-2 - Comparação de parâmetros da composição vs diferentes métodos .....	49
Tabela 4-3 - Plano experimental (valores codificados).....	50
Tabela 4-4 – Parâmetros da composição e correspondência entre valores codificados e reais de cada variável .....	50
Tabela 4-5 – Composição dos betões em kg/m <sup>3</sup> .....	51
Tabela 4-6 - Agregados utilizados na caracterização de ensaios de agregados .....	51
Tabela 4-7 – Análise granulométrica dos agregados para betões.....	53
Tabela 4-8 – Resultados dos ensaios de betões no estado fresco e respetiva classificação por classes segundo NP EN 206-9 [37] .....	65
Tabela 4-9 - Variação dos resultados no estado fresco de cada composição em relação a média da Central .....	66
Tabela 4-10 – Resultados dos ensaios de betões no estado endurecido aos 28 e 90 dias .....	70
Tabela 4-11 - Classificação do betão em função da velocidade de propagação de ultrassons [57] .....	71
Tabela 4-12 - Variação dos resultados no estado endurecido aos 28 dias de cada composição em relação a média da Central .....	72

Tabela 4-13 - Variação dos resultados no estado endurecido aos 90 dias de cada composição em relação a média da Central .....	72
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Principais marcos temporais da evolução do BAC [13], [21]–[23] .....	7
Figura 2-2 - Proporções volumétricas típicas dos materiais constituintes na composição do betão tradicional (BT) e do BAC [35].....	9
Figura 3-1 – Procedimento de mistura da argamassa inicial .....	28
Figura 3-2 – Procedimento de mistura modificado da argamassa.....	28
Figura 3-3 – Ensaio de espalhamento no mini cone: (a) dimensões do molde [26] e sequência de execução (b) enchimento; (c) rasamento; (d) medição do diâmetro.....	30
Figura 3-4 – Ensaio de escoamento: (a)dimensões do mini funil V [26] e sequência de execução (b) enchimento; (c)rasamento; (d)escoamento .....	31
Figura 3-5 - Sequência de moldagem de amostras de argamassas: (a) mistura; (b) enchimento, (c) rasamento; (d) remoção do desperdício .....	32
Figura 3-6 – Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons: a) calibração do equipamento; b) amostra de argamassa.....	34
Figura 3-7 – Ensaio de resistividade elétrica na amostra de argamassa.....	35
Figura 3-8 - Sequência do ensaio de resistência mecânica em argamassas: a) equipamento; execução da flexão: b) posicionamento da amostra, c) rotura da amostra; execução da compressão: d) posicionamento da amostra, e) rotura da amostra.....	37
Figura 3-9 - Diâmetro de espalhamento, D (mm), das argamassas AC_exp [20], AC, AO e AO_pmm .....	39
Figura 3-10 – Tempo de funil, $t_f$ (s), das argamassas AC_exp [20], AC, AO e AO_pmm .....	39
Figura 3-11 - Velocidade de propagação de ultrassons, UPV(m/s), das argamassas AC_exp [20], AC, AO e AO_pmm ao longo do tempo de hidratação das argamassas	40
Figura 3-12 - Resistividade elétrica (Ohm.m) das argamassas AC_exp [20], AC, AO e AO_pmm .....	41
Figura 3-13 - Resistência mecânica: (a) flexão, $R_f$ e (b) compressão, $R_c$ das argamassas AC_exp [20], AC, AO e AO_pmm .....	42
Figura 4-1 – Representação esquemática dos ensaios considerados no presente estudo (em valores codificados) .....	50

Figura 4-2 - Pesagem de agregados: (a) areia 0/2, (b) areia 0/4; (c) brita 1, (d) brita 2 .....	52
Figura 4-3 - Curva granulométrica dos agregados .....	53
Figura 4-4 - Procedimento de amassadura do betão .....	54
Figura 4-5 - Sequência de preparação do betão: (a) introdução dos agregados e resíduo de FCC; introdução de: (b)cimento, (c) parte de 25% da água total com Sp; (d) mistura .....	55
Figura 4-6 – Ensaio de espalhamento: a) dimensões do cone [26]; sequencia de execução b) posicionamento; c) espalhamento; d) medição do diâmetro .....	56
Figura 4-7 – Ensaio de escoamento: a) dimensões do funil V [26]; b) posicionamento; c) enchimento.....	57
Figura 4-8 – Ensaio de capacidade de passagem: a) dimensões da caixa L [26]; b) instante antes da abertura da porta deslizante; c) escoamento; d) medição da altura na extremidade.....	58
Figura 4-9 - Ensaio de resistência à compressão: equipamento a) computador e sistema hidráulico, b) prensa; .....	60
Figura 4-10 – Ensaio de espalhamento: (a) Diâmetro, D (mm); (b)Tempo do diâmetro 500 mm, $t_{500}$ (s); do conjunto de betões: C, F e CC .....	62
Figura 4-11 – Tempo de funil, $t_f$ (s) do conjunto de betões: C, F e CC .....	63
Figura 4-12 - Índice de capacidade de passagem da caixa L, do conjunto de betões: C, F e CC .....	64
Figura 4-13 - Representação dos resultados no estado fresco e parâmetros da composição .....	66
Figura 4-14 - Velocidade de propagação de ultrassons do conjunto de betões.....	68
Figura 4-15 – Resistência à compressão do conjunto de betões: (a) C, (b) CC e (c) F69	
Figura 4-16 - Representação dos resultados no estado endurecido aos 28 dias e parâmetros da composição.....	71
Figura 4-17 - Representação dos resultados no estado endurecido aos 90 dias e parâmetros da composição.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### ALFABETO LATINO

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área	m <sup>2</sup>
C <sub>var</sub>	Coefficiente de variação	-
<i>d</i>	Espessura	m
D	Diâmetro de espalhamento	mm
d	Idade	dias
F	Força	N
I	Corrente elétrica	Amperes
<i>l</i>	Comprimento	m
R; f	Resistência	MPa
<i>t</i>	Tempo	s
t <sub>500</sub>	Tempo de diâmetro 500 mm	s
t <sub>f</sub>	Tempo de funil	s
V	Volume	m <sup>3</sup>
<i>v</i>	Velocidade	m/s
U	Tensão	Volts

### ALFABETO GREGO

Símbolo	Descrição	Unidade
ρ	Resistividade elétrica	Ohm.m
μ	Média	-
σ	Desvio padrão	-

### ÍNDICES INFERIORES

Símbolo	Descrição
s	Areia
f	Flexão
c	Compressão
m	Valor médio

## NOTAÇÃO ABREVIADA ADOTADA NAS COMPOSIÇÕES DE MATERIAIS À BASE DE CIMENTO

Símbolo	Descrição
a	Ar
c	Cimento
f	Fíler
g	Agregado grosso
g, lim	Agregado grosso compactado (aparente)
m	Pasta/argamassa
p	Finos
s	Agregado fino
Sp	Superplastificante
w	Água

## NOTAÇÃO ABREVIADA ADOTADA NA QUÍMICA DO CIMENTO

Símbolo	Descrição
C <sub>2</sub> S	Silicato bicálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Aluminato ferrato tetracálcico
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio hidratado
C-A-H	Aluminatos de cálcio hidratados
C-A-S-H	Aluminossilicatos de cálcio hidratados
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratados

## SIGLAS

---

<b>Siglas</b>	<b>Descrição</b>
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAC	Betão auto-compactável
CCD	Central Composite Design
CEMBUREAU	European Cement Association
DoE	Design of experiment
EFNARC	European Federation of National Associations Representing for Concrete
EN	Norma Europeia
FCC	Fluid Catalytic Cracking
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
GEE	Gases de efeito estufa
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
NP	Norma Portuguesa
SCC	Self-Compacting Concrete
TFM	Trabalho Final de Mestrado
UE	União Europeia
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity

---



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento e justificação do tema

Os produtos de construção, e em concreto o betão que é objeto de estudo deste Trabalho Final de Mestrado (TFM), são produzidos a partir da transformação de recursos naturais utilizando energia. Segundo o Regulamento Europeu de Produtos de Construção nº 305/2011 (que revogou a Diretiva dos Produtos da Construção 89/106/CEE) [1], estes devem garantir a satisfação das exigências essenciais, ou seja, é necessário efetuar a avaliação de conformidades. O betão é um dos produtos mais utilizados a nível global e por ser um material relativamente recente em relação aos outros precisa de cumprir rigorosamente estas exigências de acordo com a regulamentação atual em vigor.

O betão tradicional ou convencional é um material constituído pela mistura devidamente proporcionada de agregados (grossos: britas; finos: areias), ligante hidráulico, água e, eventualmente, adjuvantes e / ou adições [2]. O betão auto-compactável (BAC) foi desenvolvido pelo Professor Hajime Okamura da Universidade de Tóquio no Japão na década de 80 devido a escassa mão de obra local. O BAC é um betão que dispensa a intervenção externa (humana ou mecânica) na fase de compactação no estado fresco. A compactação é feita através do peso próprio do betão e este mantém a homogeneidade [3]. A composição deste tipo de betão é semelhante ao do betão tradicional, mas a auto-compactabilidade exige a presença de adições na sua composição que são utilizadas como substitutos parciais de cimento. Em particular se as adições usadas forem resíduos de outras indústrias, o BAC apresenta, de forma integrada requisitos ao nível económico, social e ambiental que convergem para a sustentabilidade.

Neste TFM aplicou-se um plano fatorial para estudar composições de BAC com incorporação de resíduo originado na unidade de “cracking” catalítico em leito fluidizado (Fluid Catalytic Cracking – FCC) da indústria petrolífera, gerado na Refinaria de Sines da empresa PETROGAL – Petróleos de Portugal, S.A. Este resíduo é constituído essencialmente por aluminossilicatos que lhe conferem propriedades pozolânicas.

Para o efeito realizou-se uma campanha experimental que incluiu ensaios, dos BAC preparados, tanto no estado fresco como no estado endurecido. As propriedades dos BAC com incorporação de resíduo em estudo foram avaliadas à luz das especificações requeridas pelas normas europeias em vigor.

## 1.2 Objetivos e metodologia

Dois dos objetivos da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) é “Assegurar padrões sustentáveis de consumo e de produção” e “Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação” [4]. Estes objetivos enquadram-se neste TFM e são de grande importância na área do estudo que se pretende desenvolver. De facto, a utilização dos BAC permite reduzir a quantidade de resíduos, de emissões de gases poluentes (gases do efeito estufa – GEE), bem como, reduzir o consumo de matérias primas tal como se apresentará sucintamente nos capítulos seguintes.

Segundo a norma portuguesa NP EN 206-1 (Especificação, desempenho, produção e conformidade do betão) [5] os materiais constituintes do BAC são semelhantes em relação a betão tradicional (vibrado). As composições exatas destes dois tipos de betões influenciam as suas propriedades tanto no estado fresco como endurecido. O BAC tem que garantir a auto-compactabilidade ou seja sem recurso a qualquer método/energia de compactação que é a sua principal característica [6], a par desta tem-se como consequência, as exigências ao nível da trabalhabilidade, do acabamento esperado ou da durabilidade, etc.

Os trabalhos de investigação anteriores sobre a mesma área e natureza efetuados no Departamento de Engenharia Civil do ISEL sob orientação da Professora Doutora Carla Maria Duarte da Silva e Costa relacionados com a incorporação de resíduo de FCC em materiais à base de cimento, a substituição parcial do cimento é feita seguindo normas, guias, recomendações, metodologias semelhantes em percentagens que variam até os 10-30 %. Esta substituição tem uma influência direta nas propriedades dos materiais quer a curto como a longo prazo [7]–[9]. Em parceria com o ISEL também têm sido efetuados trabalhos recentes com o Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural da FEUP sob orientação da Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes, nomeadamente, na otimização de composições de materiais à base de cimento inclusive com a incorporação de resíduo de FCC utilizando métodos estatísticos.

A otimização de processos e produtos a nível industrial é feita utilizando métodos estatísticos, como é o caso dos planos fatoriais. Esta abordagem aplicada em engenharias utiliza técnicas rigorosas para alcançar objetivos específicos. É muito recente a sua aplicação em materiais à base de cimento com incorporação de resíduo de FCC, nomeadamente na otimização de composições com o objetivo de melhorar as suas propriedades.

Neste sentido, estabeleceram-se os seguintes objetivos:

- Desenvolver um plano fatorial de experiências para identificar composições de betões com incorporação de FCC assegurem auto-compactabilidade.
- Analisar o efeito das diferentes variáveis de mistura em particular do teor de resíduo de FCC nas propriedades de BAC no estado fresco bem como na velocidade de propagação de ultrassons e na resistência à compressão.
- Avaliar os valores das propriedades dos BAC com incorporação de resíduo de FCC à luz das especificações requeridas pelas normas europeias em vigor.

A metodologia deste TFM consistiu em rever os conhecimentos sobre os materiais de construção nomeadamente as suas propriedades e a sustentabilidade no uso de substituintes parciais do cimento. Em seguida desenvolveu-se uma proposta para o plano do TFM no qual foram definidos os objetivos, as atividades e o cronograma da campanha experimental.

Efetuuou-se numa primeira fase a realização de atividades preliminares de modo a garantir a reprodutibilidade na realização de ensaios tendo em conta a análise da disponibilidade de recursos e outros trabalhos em curso no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do ISEL.

A campanha experimental apresentou as seguintes fases:

- Caracterização dos agregados a utilizar na preparação de betões
- Otimização das composições de argamassas, validação do modelo experimental através da do ensaio de misturas de otimizadas.
- Conceção das composições de betões utilizando um plano fatorial de ensaio de misturas assumindo como variáveis independentes as razões  $V_g/V_{g,lim}$  e  $V_s/V_m$  e recolha de dados
- Análise dos resultados obtidos das argamassas e betões utilizando o tratamento estatístico

Para todas as argamassas e betões, foram realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido. Os ensaios no estado fresco ao nível do betão foram os seguintes: espalhamento, caixa L e funil V. E no estado endurecido foram os seguintes: velocidade de propagação de ultrassons e resistência à compressão. O subcapítulo seguinte apresenta a estrutura da redação da dissertação do TFM.

### **1.3 Estrutura do TFM**

A presente dissertação é constituída por 5 capítulos, cujo conteúdo inclui a introdução, objetivos, síntese de conhecimentos, procedimento experimental, resultados e respetiva análise, conclusão e desenvolvimentos futuros.

No capítulo 1 é feita a introdução ao tema com o devido enquadramento e as razões que justificam a sua escolha e importância, descrevem-se os objetivos, metodologia utilizada e a organização da informação.

No capítulo 2, efetua-se uma síntese acerca do estado do conhecimento atual do desenvolvimento do BAC e respetiva produção tendo em conta os fatores técnicos, económicos, sociais e ecológicos. Apresenta-se a conceção da composição do BAC utilizando o plano fatorial e o efeito dos materiais na produção de BAC bem como todas as etapas associadas a este.

O capítulo 3, descreve o procedimento experimental utilizado durante a campanha, é realçada a contribuição dos trabalhos de investigação anteriores do mesmo âmbito, o plano fatorial de experiências, a seleção e caracterização dos materiais, estudo da composição, plano de ensaios para avaliação de propriedades no estado fresco e no estado endurecido em argamassas e betões.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na campanha experimental e é feita a respetiva análise e discussão. Além da verificação dos resultados através normas e procedimentos adaptados, é feita uma comparação qualitativa em relação a trabalhos anteriores. Na análise de resultados não foi efetuado o ajuste de modelos numéricos para determinar a gama de parâmetros da composição otimizada (secção 4.5.3)..

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais, contribuições deste trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 SÍNTESE DE CONHECIMENTOS

### 2.1 Considerações iniciais

O presente capítulo é uma síntese de conhecimentos em relação ao betão auto-compactável nomeadamente, uma componente histórica conducente ao seu desenvolvimento (secção 2.2), a forma como pode contribuir para a sustentabilidade da indústria da construção (secção 2.2), os seus constituintes típicos (secção 2.3) e os métodos para a sua conceção (secção 2.4).

O betão é o material de construção mais utilizado no mundo devido, essencialmente, às suas características nomeadamente, resistência mecânica e durabilidade. O crescimento exponencial da população ao longo dos últimos dois séculos (mais de 5 biliões de pessoas) [10], impulsionado fortemente pela Revolução Industrial (Séc. XIX), traduziu-se num aumento paralelo das necessidades, e consumo, de betão [11], [12]. Contudo, o aumento exponencial da produção de betão tem associado o aumento significativo da extração de matérias-primas não renováveis da natureza e a sua transformação implica, também, o aumento expressivo tanto do consumo energético como da emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para a natureza [13]. Estes fatores (consumo energético e emissão de  $\text{CO}_2$ ) são sérias ameaças ambientais por serem causas das alterações climáticas, como por exemplo do aquecimento global.

Atualmente, a preocupação de desenvolvimento sustentável tem em consideração o equilíbrio entre as necessidades de desenvolvimento e o meio ambiente, visando melhorar as condições de vida atuais sem comprometer as gerações futuras [4]. Este conceito aplicado aos materiais de construção à base de cimento traduz-se, essencialmente, na redução da extração de matérias primas não renováveis e consumo de energia associado ao processo de produção e reutilização de resíduos e de subprodutos nas suas composições [14].

Este TFM pretende contribuir para o desenvolvimento de BAC com incorporação de um resíduo gerado durante o processo de refinação do petróleo na sua composição. É reconhecido que o uso de adições, tais como cinzas volantes, pó de vidro ou sílica de fumo, pode reduzir a utilização de cimento na composição dos produtos finais, nomeadamente betões e, simultaneamente, contribuir para produtos finais com melhores propriedades incluindo durabilidade [2], [15]. Em concomitância, a adoção desta prática também pode conduzir a poupanças de energia, matérias-primas naturais e de custos na produção do seu constituinte mais relevante, o cimento.

## 2.2 Contributo do BAC para o desenvolvimento sustentável

A utilização de materiais de construção com ligantes inorgânicos precursores dos atuais materiais à base de cimento teve origem em civilizações antigas (egípcias, romanas e gregas) [13].

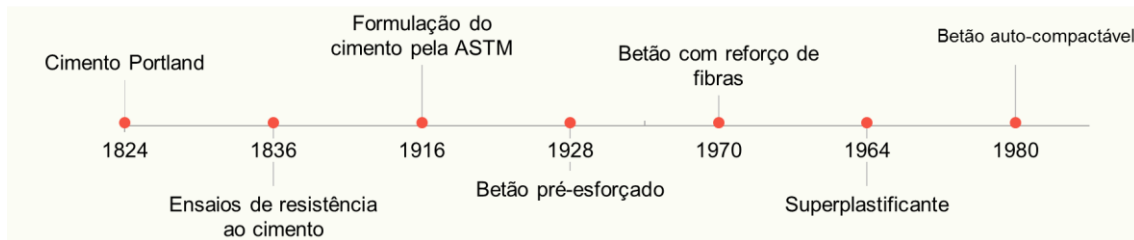
Ao longo do tempo, a evolução destes materiais foi, inicialmente, sobretudo marcada pelo aperfeiçoamento das suas propriedades físicas, químicas e mecânicas visando dar resposta às necessidades de conforto e segurança do Homem. Atualmente, com necessidade da tomada de consciência surgem diferentes perspetivas de análise, sendo a ambiental uma das mais importantes no panorama global e que integra o novo conceito de sustentabilidade [16].

Neste sentido, têm sido usados resíduos de processos industriais, tais como cinzas volantes, um subproduto de usinas de energia movidas a carvão, cimento de poeiras do forno, cinzas vulcânicas, escória de alto forno moída, cinzas de casca de arroz e sílica ativa [16]–[19]. Como se descreverá com mais pormenor à frente na seção 2.3.1.3, a utilização do resíduo de FCC (gerado na indústria da refinação do petróleo) como adição do BAC também se revelou promissora [7], [8], [15], [20].

Neste contexto, o trabalho a realizar no âmbito deste TFM pretende contribuir para o estudo de BAC com incorporação de um resíduo gerado durante o processo de refinação de petróleo com aplicação de um plano fatorial de ensaios e, conseqüentemente, para a produção de BAC com menor impacto ambiental e avaliar as conseqüências da incorporação deste resíduo nas suas propriedades.

Os BAC são betões cujos constituintes são, tipicamente, os mesmos que os usados nos betões tradicionais (seção 2), mas em quantidades distintas de forma a assegurar capacidade de preencherem completamente os moldes apenas por ação do próprio peso sem necessidade de recorrer a métodos de compactação incluindo a vibração [17].

A Figura 2-1 apresenta a evolução dos principais marcos ao longo do tempo que culminaram na descoberta, e desenvolvimento, do BAC [21], desde a formalização da descoberta do cimento Portland (em 1824) que é o ligante hidráulico, ainda atualmente, mais utilizado no mundo, incluindo Portugal [13].



**Figura 2-1 - Principais marcos temporais da evolução do BAC [13], [21]–[23]**

Da análise da Figura 2-1 constata-se que foram necessários mais de 150 anos desde a patenteação do cimento Portland (em 1824) até descoberta e desenvolvimento do BAC na década de 80 do século passado, no Japão.

O BAC foi concebido com o objetivo de melhorar a durabilidade das estruturas de betão armado cuja fragilidade foi, essencialmente, associada a deficiências de execução da compactação do betão nos moldes devido à escassez de trabalhadores especializados nesta tarefa [17], [24]. Contudo, estes materiais apresentam diversas vantagens quer ao nível de projeto, aplicação e durabilidade das quais destacam-se as seguintes [17], [24]–[26]:

- economia de recursos (humanos, equipamentos, energia)
- possibilidade de recorrer a novos sistemas construtivos com maior complexidade, melhor flexibilidade (armaduras) e melhores acabamentos
- redução do ruído associado ao processo de vibração
- melhoria da qualidade de vida, saúde e segurança no local da construção
- possibilidade de incorporar quantidades significativas de adições nomeadamente, de resíduos de outras indústrias contribuindo para o aumento da sustentabilidade destes materiais.

No que concerne às desvantagens, uma das mais importantes em relação ao BAC atualmente é a económica e todas as que lhe estão associadas nomeadamente na fase de produção das quais destacam-se as seguintes [25], [26]:

- Custo de materiais (maior incorporação de finos)
- Controlo de qualidade exigente
- Mão de obra especializada no processo de produção
- Fraca interação entre a indústria e tecnologia

Tendo em consideração as vantagens dos BAC enunciadas atrás, para que a sua extensão de aplicação em relação ao betão tradicional aumente é, ainda, necessário estabelecer métodos rigorosos e expeditos para determinar a sua composição tendo em conta a função a que se destinam e de forma económica e reproduzível bem como, aprofundar procedimentos e especificações para realizar ensaios de avaliação da auto-compactabilidade (laboratoriais e em obra) e das suas propriedades ao longo da sua vida útil [27]. A **Tabela 2-1**, apresenta a compilação dos vários eventos e instituições que contribuíram para o desenvolvimento da investigação, regulamentação e divulgação dos BAC.

**Tabela 2-1 - Evolução temporal de marcos sobre o estado do BAC entre 1980-2016**

<b>Ano</b>	<b>Descrição</b>	<b>Referências bibliográficas</b>
<b>1980-1990</b>	<p>“Proposed Design of Self-compacting concrete (prototype)” - Hajime Okamura <i>et al</i>,Tokyo University</p> <p>“High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures” - The Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering &amp; Construction, Chiang Mai</p>	[21], [24], [27]
<b>1990-2000</b>	<p>“Joint Research at University of Tokyo” – Constructions companies; Cement, admixture and concrete makers</p> <p>“Super-Flowable Concrete” – Japan Concrete Institute (JCI)</p> <p>“Highly-Flowable Concrete” – Japan Society of Civil Engineers (JSCE)</p> <p>“Self-Compacting Concrete” – JSCE; The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM)</p> <p>“Recommendations for Self-Compacting Concrete” – JSCE</p>	[27], [28]
<b>2000-2010</b>	<p>“Self-Compacting Concrete” (TC 174; TC 188; State-of-the-Art report of RILEM)</p> <p>“The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use” - Self-Compacting Concrete European Project Group (EFNARC)</p> <p>“Congresso Ibero-americano sobre betão auto-compactável” (BAC) – (Países de Língua oficial Portuguesa e Espanhola)</p>	[24], [29]–[31]
<b>2010-2016</b>	<p>“NP EN 206-9 – Regras adicionais para betão auto-compactável (BAC)” – Instituto Português da Qualidade (IPQ)</p> <p>“NP EN 12350-8:12” – Ensaio do betão fresco: betão auto-compactável” – Instituto Português da Qualidade (IPQ)</p>	[32]–[34], [37]

### 2.3 Materiais constituintes do betão auto-compactável

Os constituintes do betão tradicional são, essencialmente, os mesmos dos BAC, ou seja, materiais finos, agregados, adjuvantes e água – sendo que as diferenças principais entre materiais decorrem, sobretudo, das proporções em que os constituintes estão presentes nas suas composições. A Figura 2-2, apresenta as proporções volumétricas, típicas, em que os constituintes estão presentes na composição do betão tradicional e o BAC [35].

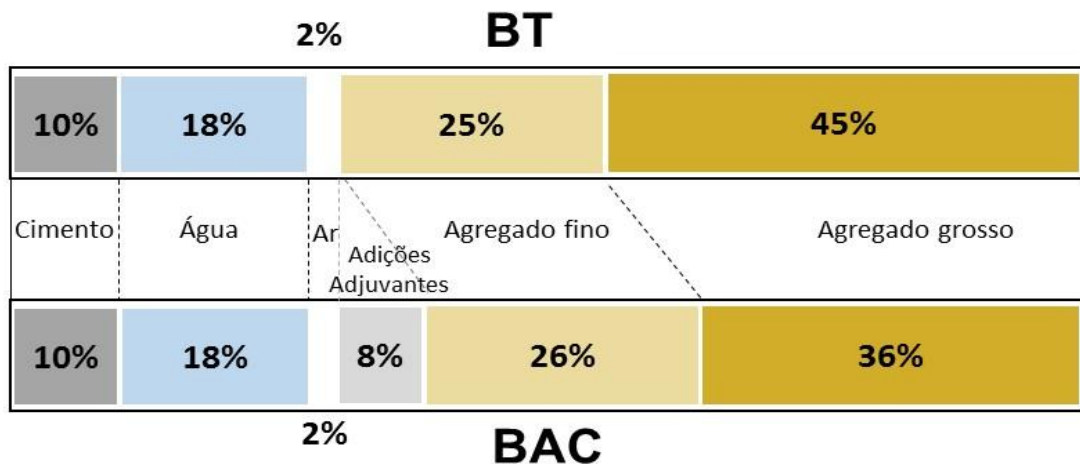


Figura 2-2 - Proporções volumétricas típicas dos materiais constituintes na composição do betão tradicional (BT) e do BAC [35]

A Figura 2-2 mostra que os teores de cimento, água, ar e agregado fino são semelhantes para ambos. As maiores diferenças do BAC em relação ao betão tradicional advêm da presença de maior quantidade de materiais finos, ou seja, adições bem como uma menor quantidade de agregado grosso e menor distribuição de tamanho de partícula que são essenciais para garantir a auto-compactabilidade [19], [24]. Se o uso de adições forem subprodutos industriais correspondem à reutilização de resíduos com vantagens ambientais.

Desta forma, os BAC exigem um rigoroso controlo da dimensão máxima da partícula de agregado grosso que, em geral, é inferior a 20 mm de acordo com os trabalhos desta natureza [17], [24], [36] e este valor é condicionado pelas classes de consistência definidas para o estado fresco segundo a NP EN 206-9 [37]. Adicionalmente, embora a natureza e a quantidade de adjuvantes (superplastificantes, agentes de viscosidade e introdutores de ar, entre outros) incluídos no BAC sejam semelhantes aos do betão tradicional a sua seleção e otimização é muito importante nos BAC dada a relevância destes materiais na passagem do estado fresco para o estado endurecido dos betões e

a exigência que as propriedades no estado fresco (resistência à segregação) têm no desempenho dos BAC [17].

A conceção da composição de um BAC tal como no betão tradicional depende de diferentes fatores: influência dos materiais constituintes, método da definição que serão abordados com maior detalhe ao longo da seção 3.2

### 2.3.1 Materiais finos

São todos os materiais (ligantes hidráulicos, adições e inclusivé a parte mais fina do agregado fino) com partícula inferior à 0,125 mm.

#### 2.3.1.1 *Ligantes hidráulicos*

Os ligantes hidráulicos são substâncias que ao reagirem quimicamente com a água ganham presa e endurecem, ligando os materiais sólidos (que podem incluir agregados). O processo de endurecimento ocorre espontaneamente, à temperatura ambiente, tanto fora com dentro de água [13]. O ligante hidráulico mais vulgarmente usado especialmente na preparação de betões é o cimento.

Atualmente, a norma europeia transposta para a norma portuguesa NP EN 197-1 [38], estabelece a composição, especificações e critérios de conformidade dos 27 tipos cimentos correntes que podem ser usados e comercializados na Europa. Esta norma especifica ainda os cinco tipos principais de cimentos correntes que são: Cimento Portland (CEM I); Cimento Portland composto (CEM II) que para tem outro(s) constituinte(s) principal(is) para além de clínquer; cimento de alto forno (CEM III); cimento pozolânico (CEM IV) e cimento composto (CEM V).

Atualmente, o cimento mais usado, em Portugal, na produção de betão é o cimento Portland composto no qual o outro constituinte principal é calcário e com um teor de incorporação de 20%, em massa [13], [39], [40]. De acordo com a norma NP EN 197-1 [38] este cimento designa-se cimento Portland de calcário e assume a notação de CEM II/A-L. Neste TFM, como se descreverá com mais detalhe à frente (secção 2.3.1.2), juntar-se-á à composição dos BAC 20% (em massa) de calcário relativamente ao cimento porque neste trabalho se usa um cimento CEM I e se pretende simular a utilização de um cimento CEM II/A-L.

As matérias-primas do cimento são, essencialmente, 75 % de calcário e 25 % de argila. Durante o processo de produção do cimento estes compostos são decompostos e os seus elementos constituintes são rearranjados dando origem aos compostos químicos

que constituem o clínquer e que são os que abaixo se apresentam (bem como entre parêntesis a percentagem mássica típica em que estão presentes no cimento) [13]:

- silicato tricálcico  $C_3S$  (30 a 70 %%)
- silicato bicálcico  $C_2S$  (10 a 30%)
- aluminato tricálcico  $C_3A$  (5 a 10%)
- aluminotoferrato tetracálcico  $C_4AF$  (5 a 15%).

Aa abreviaturas associadas aos compostos apresentados acima correspondem à notação química específica usada no domínio da *Química do Cimento* [2].

O cimento corrente do tipo CEM I (norma NP EN 197-1 [38]) é o material que se obtém da moagem fina do clínquer (92 a 97%) com gesso (3 a 8%). Os cimentos correntes dos outros - CEM II a CEM IV – possuem pelo menos outro constituinte principal, para além do clínquer, de entre estes materiais previstos na norma que são os seguintes: escória de alto-forno, sílica de funo, pozolana, cinza volante, xisto e calcário.

O processo de presa e de endurecimento do cimento decorre, essencialmente, das reações dos compostos que constituem o clínquer (Eqs 2.1 a 2.4) dando origem à formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H), aluminossilicatos de cálcio hidratados (C-A-S-H), hidróxido de cálcio hidratado ( $Ca(OH)_2$ ) que se representa como CH na notação química do cimento.



A composição químico-mineralógica específica de cada um dos compostos determina a sua reatividade com a água e, conseqüentemente, as propriedades ligantes que exibem [13]. As propriedades do cimento conduzem a alterações químicas, físicas que determinam as propriedades no estado fresco, nomeadamente, a auto-compactabilidade deve-se geralmente a dois efeitos [41]:

- Alteração da trabalhabilidade do BAC devido à maior ou menor dispersão das partículas de cimento;
- Alteração da viscosidade plástica devido à distribuição das dimensões das partículas e, inclusivamente, devido à forma das mesmas.

### 2.3.1.2 Adições do tipo I

A norma portuguesa NP EN 206-1 [5] considera dois tipos de adições possíveis na constituição dos betões:

- Adições do tipo I – quase inertes (por exemplo, o filler calcário)
- Adições do tipo II – pozolânicas ou potencialmente hidráulicas (por exemplo, escórias de alto-forno, cinzas volantes e sílica de fumo)

A adição tipo I, frequentemente usada na constituição de BAC é o filler calcário com o objetivo principal de aumentar o teor o volume de finos, completar a curva granulométrica e preencher os poros sendo essencial a este tipo de betões para controlo da segregação, eliminação da exsudação, aumento da compactidade e aumento da deformabilidade do BAC no estado fresco contribuindo assim para o aumento da durabilidade [7], [13], [27].

### 2.3.1.3 Adições do tipo II

A adição tipo II, são materiais siliciosos ou aluminossilicatos que podem ter origem natural ou serem subprodutos industriais que, por si só, possuem pouco ou nenhum poder cimentício, estes materiais que se designam pozolânicos (Pz) não reagem espontaneamente com a água, mas na presença de hidróxido de cálcio adquirem propriedades hidráulicas, isto é, propriedades cimentícias dando origem a aluminossilicatos hidratados (C-A/S-H) que se apresenta na Eq. (2.5). Os produtos destas reações são semelhantes aos originados na hidratação dos constituintes do clínquer Portland [7].



Na formulação de BAC têm sido usados vários materiais pozolânicos como cinzas volantes [42], escória de alto forno [43], vidro em pó [44], entre outros. Neste TFM preparam-se BAC usando um material pozolânico que é gerado na unidade de *cracking* catalítico em leito fluidizado pelo que se apresenta com mais detalhe na seção 2.3.1.3.1.

#### 2.3.1.3.1 Resíduo FCC da refinação do petróleo

O resíduo de FCC, (do inglês, Fluid Catalytic Cracking) é um produto que tem origem na refinação do petróleo na unidade de cracking. É um catalisador exausto sem atividade catalítica que é constituído essencialmente por aluminossilicatos. A otimização das composições de BAC com incorporação de resíduo de FCC conseguiu-se com base

nos trabalhos anteriores [20] fixar neste TFM, a substituição de cimento por resíduo de FCC 21,30%.

A incorporação de resíduos industriais com elevada atividade pozolânica na produção de materiais à base de cimento oferece as seguintes vantagens: ambiental, através da diminuição da matéria prima, poupança de energia e a redução das emissões de CO<sub>2</sub>; económica, através da substituição de materiais caros por mais baratos; e tecnológica, através da melhoria significativa de propriedades no estado fresco e endurecido [15], [45].

Em Portugal, os estudos com incorporação do resíduo de FCC têm vindo a ser desenvolvidos pela Professora Doutora Carla Maria Duarte da Silva e Costa, docente no ISEL. Estes estudos têm comprovado as vantagens da substituição parcial de ligantes hidráulicos pelo resíduo de FCC das quais destaca-se o contributo para a sustentabilidade [7]–[9], [15], [20], [46].

O resíduo de FCC como material pozolânico tem sido utilizado nas últimas décadas [45]. A nível mundial o resíduo tem sido utilizado em materiais à base de cimento em diversos países como o Brasil, Espanha, Colômbia, China, entre outros [45], [47]–[51].

### 2.3.2 Agregados

Os agregados segundo a norma NP EN 206-1 [5] são materiais minerais granulares que podem ser naturais, artificiais ou reciclados de materiais previamente usados na construção. Nos betões a dimensão do tamanho da partícula para o agregado fino encontra-se entre 0,125 mm e 4 mm; para o agregado grosso encontra-se entre 4 mm e 20 mm [52], [53].

De qualquer forma, tal como no betão tradicional os agregados presentes na composição do betão desde a areia fina à brita devem apresentar uma distribuição de tamanho de partículas contínua de modo que a mistura de agregados tenha a maior compactidade possível minimizando o conteúdo de vazios bem como a quantidade de pasta de cimento necessárias [2].

As características dos agregados que influenciam a capacidade de auto-compactação são a quantidade, a natureza e o tipo de agregados. Sendo que as mais relevantes para o agregado grosso são o volume e a máxima dimensão; e para o agregado fino, a distribuição granulométrica e a forma das partículas [52].

### 2.3.3 Adjuvantes

O adjuvante segundo a norma NP EN 206-1 [5] é um material adicionado, durante o processo de mistura dos constituintes do betão na sua preparação, em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, para modificar as propriedades do betão no estado fresco ou endurecido. Tipicamente o teor de incorporação dos adjuvantes é inferior a 5%, em massa, da quantidade de ligante.

Neste âmbito o tipo de adjuvantes é bastante diversificado, podendo referir os mais relevantes na área de estudo dos BAC [24], [27], [41]:

- Superplastificantes ou redutores de água de alta gama
- Plastificantes ou redutores de água
- Agentes de viscosidade

No caso dos superplastificantes, o principal motivo para a sua utilização está associado à necessidade de minimizar a quantidade de água na composição dos BAC de forma a garantir uma adequada viscosidade, sendo ajustado de modo a garantir suficiente deformabilidade. Por outras palavras, as propriedades de auto-compactabilidade podem conseguir-se pela utilização de superplastificantes de modo combinado com uma elevada quantidade de materiais finos [41].

### 2.3.4 Água

Segundo a norma NP EN 1008 [54] a aptidão da água para o fabrico de betão depende da sua constituição química. No caso da definição da composição dos BAC, é necessário ter em conta o teor de água, dentro da qual são satisfeitas as especificações do betão no estado fresco. As suas principais funções são [41]:

- Molhar os agregados;
- Participar nas reações químicas de hidratação do cimento e da pozolana (Eq. 2-1 à Eq. 2-4 e Eq. 2-5) respetivamente.
- Conferir consistência à mistura, ou seja, conferir ao betão as propriedades reológicas requeridas (o aumento da quantidade de água corresponde a um aumento da fluidez no estado fresco e a uma diminuição da viscosidade da pasta).

## 2.4 Métodos de definição da composição de um BAC

Os métodos de definição da composição de um BAC são complexos porque envolvem diferentes materiais constituintes de natureza e funções distintas (secção 2.3). De uma forma genérica, a determinação da composição de um BAC pode ser dividida em três fases [24]:

- Numa primeira fase, devem ser definidas as exigências de desempenho que se colocam ao betão com base nas condições estruturais, construtivas e ambientais da aplicação em causa.
- A fase seguinte consiste na seleção dos materiais, a sua caracterização e definição preliminar da composição do betão.
- Na fase final, deve verificar-se se a composição em relação à composição inicial satisfaz as exigências de desempenho.

Caso algum aspeto não seja satisfeito, a composição deverá ser revista e testada até se alcançar o desempenho pretendido.

Na literatura é possível encontrar uma gama alargada de composições que satisfazem os critérios da auto-compactabilidade. Portanto, não há uma única composição original para uma dada aplicação ou conjunto de requisitos de desempenho. Embora os materiais constituintes para o BAC sejam os mesmos que os utilizados no betão tradicional um fator importante e decisivo para a conceção da composição é perceber o efeito de cada material constituinte e a sua interação nas propriedades do BAC [20].

Existem atualmente uma variedade de métodos de conceção dos quais distinguem-se três tipos de abordagens. A primeira abordagem é baseada em experiências laboratoriais, pelo método tentativa-erro. A segunda é baseada na otimização do volume da pasta do betão, enquanto, a terceira abordagem utiliza análises estatísticas baseadas em planos fatoriais [55].

É importante realçar que a maior parte destas abordagens genericamente não tem em conta na conceção da composição as propriedades do BAC a longo prazo. Ao contrário dos métodos com origem no de Okamura *et al* [21], nos métodos de conceção ocidentais o melhoramento das propriedades a longo prazo sempre foram uma preocupação.

Na secção seguinte apresentam-se vários métodos de conceção das misturas fazendo referencia à região e a data quando possível [36], [41], [57]. De entre estes efetuou-se a descrição do mais relevante e na Tabela 4-2 (secção 4.2) efetua-se uma comparação através dos parâmetros da composição em estudo neste TFM.

#### 2.4.1 Métodos orientais

Do extremo oriental, surgiram os primeiros métodos que são reconhecidos globalmente até hoje na concepção de BAC. Apresentam-se, em seguida, três exemplos de métodos orientais conhecidos:

- Método de Okamura *et al* (Tóquio, Japão, 1988) [21]
- Método da JSCE<sup>1</sup> (Tóquio -Japão,1998) [58]
- Método de Nan Su (Taiwan – China, 2001) [59]

O método de Okamura *et al* [21] foi desenvolvido pelo grupo de trabalho da Universidade de Tóquio liderado pelos Professores Doutores Hajime Okamura, Kazumasa Ozawa e Koichi Maekawa. Foi o primeiro método proposto a nível mundial para o cálculo da composição de BAC.

A metodologia de Okamura *et al*, para concepção da composição de BAC é seguida pelos seguintes passos: a definição da dosagem de ar, os volumes de agregados grosso e finos, a razão volumétrica água/finos e a dosagem de superplastificante. Para estes dois últimos parâmetros efetuam-se ensaios preliminares da pasta no estado fresco de modo a avaliar as propriedades de auto-compactabilidade e ajustar os restantes parâmetros da composição [24], [36].

#### 2.4.2 Métodos ocidentais

Após o desenvolvimento no Japão na década de 80-90, e a sua utilização na Europa iniciou a partir dos primeiros anos da década de 90. Depois da chegada à Europa, este começa a ser utilizado na América do Norte nos finais da década de 90. Hoje é largamente utilizado no ocidente na maior parte das vezes na pré-fabricação e reabilitação de edifícios e de superestruturas. Apresentam-se a seguir exemplos dos métodos ocidentais:

- Método EFNARC<sup>2</sup> (Reino Unido, União Europeia, 2002) [53]
- Método Tutikian *et al* (Rio Grande do Sul, Brasil, 2004) [18], [60]
- Método ACI<sup>3</sup> – (Michigan, Estados Unidos da América, 2007) [61]

---

<sup>1</sup> Do inglês Japan Society of Civil Engineers

<sup>2</sup> Do inglês European Federation of National Association Representing for Concrete

<sup>3</sup> Do inglês American Concrete Institute

O método EFNARC foi publicado através do “Guia e especificações para betão auto-compactável” pela federação europeia de produtores e utilizadores de betão de cada estado membro da UE. Este guia desenvolveu-se e deu origem a um grupo de trabalho europeu sobre betão auto-compactável que é constituído pela EFNARC, BIBM<sup>4</sup>, CEMBUREAU, ERMCO<sup>5</sup> e EFCA<sup>6</sup> que em 2005 atualiza o guia anterior publicado pela EFNARC e adiciona “Especificações, produção e utilização” [29]. Este grupo agrega a maior parte do trabalho desenvolvido nesta área a nível europeu, onde é relevante o trabalho efetuado pelos países do norte da Europa no desenvolvimento do BAC a nível continental [62].

Este guia não apresenta nenhuma metodologia de cálculo, mas antes um conjunto de recomendações que são baseadas no método de Okamura *et al.* Numa primeira fase são definidos intervalos para determinados parâmetros da composição que asseguram a auto-compactabilidade, estes parâmetros são os seguintes: razões volumétricas de água e material fino e mássica de água cimento; volumes de material fino, agregado grosso e limitação do volume total de água. Na segunda fase efetua-se o cálculo da composição dos elementos do BAC, nomeadamente, o volume total do agregado grosso, agregado fino, definição do volume de ar e. Propõem-se ensaios semelhantes aos propostos no método de Okamura *et al.*

#### 2.4.2.1 Métodos portuguesas

Em Portugal e como na maior parte do sul dos países europeus onde existe uma grande oferta em relação à mão de obra é pouco expressiva a utilização de BAC. No entanto, nas últimas duas décadas têm sido desenvolvidos diversos trabalhos de investigação científica com apoio de diversas instituições, empresas e interessados nesta área de estudo. Estas sinergias têm desenvolvido grupos de trabalho com o objetivo de aumentar a eficiência, eficácia da produção e aplicação de BAC nas mais diversas áreas do setor da construção. Destacam-se os trabalhos sobre métodos da conceção da composição de betão dos Professores Doutores Rui Ferreira e Miguel Nepomuceno, cujos os métodos são os seguintes:

- Método de Ferreira (Guimarães - Portugal, 2001) [27]
- Método de Nepomuceno (Covilhã - Portugal, 2005) [36]

---

<sup>4</sup> Do francês Bureau International du Béton Manufacturé

<sup>5</sup> Do inglês European Ready Mixed Concrete Organization

<sup>6</sup> Do inglês European Federation of Concrete Admixtures Associations

O método proposto por Ferreira segue uma abordagem racional que é baseado no método de curvas de referência (curva de *Fauy*) que é semelhante ao do estudo de composição de betões normais. Uma curva granulométrica de referência representa a mistura na forma mais otimizada possível, conferindo ao betão a compacidade prevista em função de todos os condicionamentos, desde as condições de aplicação, incluindo os meios de compactação, até à própria natureza do agregado [26].

O método proposto por Nepomuceno é um método com abordagem experimental no qual se segue uma metodologia de cálculo para as composições de BAC. Tal como os restantes métodos este é baseado nos métodos de Okamura *et al* e da JSCE, no entanto, este método introduz novos parâmetros para o controlo das propriedades a longo prazo.

A metodologia de cálculo é feita em quatro fases: sendo que na primeira fase definem-se dados essenciais de base (definição de propriedades no estado fresco e endurecido). A segunda fase corresponde a seleção e caracterização dos materiais a serem utilizados. Na terceira e quarta fase efetuam-se os ensaios preliminares em argamassas e betões, respetivamente, onde se definem valores para determinados parâmetros da composição através de correlações de parâmetros (gráficos), cálculo dos elementos da composição utilizando formulas, avaliação dos parâmetros reológicos através de ensaios preliminares de forma semelhante ao efetuado no método de Okamura.

#### 2.4.3 Abordagem estatística baseada em planos fatoriais

A abordagem com base em planos fatoriais refere-se ao processo de planejar as experiências de tal forma que possam ser recolhidos dados de boa qualidade que, posteriormente, podem ser analisados recorrendo a métodos estatísticos e com eles construir modelos empíricos que permitem extrair conclusões válidas e objetivas; e envolvendo um numero mínimo de experiências. Os modelos numéricos podem, posteriormente, ser manipulados matematicamente para diversos efeitos, em particular, a otimização das misturas. Em geral, após formular o problema a abordagem segundo planos fatoriais envolve os seguintes passos [56]:

1. escolha dos fatores (parâmetros da mistura), níveis a considerar e intervalos de variação;
2. seleção das variáveis de resposta;
3. escolha do tipo de plano fatorial;
4. realização das experiências;
5. análise estatística dos dados (ajuste de um modelo numérico);

6. outros cálculos envolvendo os modelos ajustados (otimização) e conclusões.

Baseado no método de Okamura *et al.* (University of Tokyo, 2008) a composição do BAC pode ser definida à custa dos seguintes parâmetros: razão volumétrica água/finos ( $V_w/V_p$ ), razão água/cimento, em massa ( $w/c$ ), razão superplastificante/total de finos, em massa ( $S_p/p$ ), razão volumétrica areia/argamassa ( $V_s/V_m$ ); razão entre o volume de agregado grosso/ volume máximo de agregado grosso que é possível incluir em  $1 \text{ m}^3$ , no estado compactado, ( $V_g/V_{g,lim}$ ); e a relação entre as areias em massa ( $s_1/s_2$ ), caso se utilize uma mistura de duas areias como agregado fino. O conteúdo em ar é geralmente fixado em 2%. Desta forma, para o estudo ao nível das argamassas podem ser utilizadas todas as variáveis com exceção de  $V_g/V_{g,lim}$  e  $s_1/s_2$ , uma vez que se utiliza apenas a areia normalizada como um agregado modelo e não as areias reais [56]. Por sua vez, no estudo ao nível do betão adotam-se como variáveis independentes apenas as relativas ao esqueleto sólido formado pelos agregados ( $V_g/V_{g,lim}$ , e  $V_s/V_m$ ), pois a composição da pasta mantém-se fixa, resultando do estudo previamente efetuado ao nível da argamassa [20], [56].



### 3 ESTUDO DAS ARGAMASSAS

#### 3.1 Considerações iniciais

Como referido anteriormente (secção 1.2) este TFM tem como objetivos últimos a preparação de BAC incluindo o resíduo de FCC gerado na indústria petrolífera bem como, avaliar o efeito da incorporação deste resíduo nas propriedades dos betões. As composições dos BAC a preparar foram determinadas aplicando um plano fatorial de experiências em duas fases. Na primeira fase esta metodologia de ensaios foi aplicada ao nível da argamassa tendo conduzido à obtenção de modelos numéricos que permitem selecionar a composição das misturas em função de propriedades de engenharia pré-estabelecidas [20], [56]. Estes modelos numéricos foram validados experimentalmente neste TFM através do ensaio da composição da argamassa otimizada. A segunda fase do trabalho refere-se ao estudo ao nível do betão e encontra-se descrita na secção 4.1.

Nas secções seguintes apresentam-se as atividades experimentais desenvolvidas neste TFM, nomeadamente, a identificação e caracterização dos materiais utilizados na preparação das argamassas (secção 3.3); os procedimentos de mistura e os protocolos dos ensaios realizados no estado fresco e endurecido das argamassas (na secção 3.4). Os resultados obtidos são apresentados na secção 3.5, expressos numericamente em tabelas e quando possível através de figuras, sempre de forma sucinta. O registo completo dos resultados das argamassas é apresentado no anexo C.

A análise dos resultados experimentais obtidos ao nível da argamassa serviu para validar os modelos numéricos obtidos para as argamassas, servindo de base para a definição do plano experimental a desenvolver ao nível do betão (secção 3.6). Os ensaios ao nível da argamassa têm por objetivo:

- Avaliar a reprodutibilidade do operador e os materiais – argamassa AC
- Validar os modelos numéricos obtidos – argamassa AO
- Avaliar a influência do procedimento de amassadura nas propriedades das argamassas – argamassa AO\_pmm.

A necessidade e importância encontram-se descritas com mais detalhe na secção 3.6.

A Tabela 3-1 apresenta uma sistematização dos ensaios experimentais realizados, dos procedimentos de ensaio adotados e das secções deste documento onde os procedimentos de ensaio são apresentados com mais detalhe.

**Tabela 3-1 - Atividades de ensaios do programa experimental para argamassas**

<b>Argamassas</b>	
<b>Ensaio no estado fresco</b> <b>(secção 3.4.2)</b>	Espalhamento (mini cone) Procedimentos de Okamura <i>et al</i> e Nepomuceno [24], [26], [36]  Escoamento (mini funil V) Procedimentos de Okamura <i>et al</i> e Nepomuceno [24], [26], [36].
<b>Moldagem, desmoldagem e condicionamento</b> <b>(secção 3.4.3)</b>	NP EN 196-1 [63] / NP EN 12390-1 [64] / NP EN 12390-2 [65]
<b>Ensaio no estado endurecido</b> <b>(secção 3.5.2)</b>	Velocidade de propagação de ultrassons NP EN 12504-4 [66] / ASTM C597-16 / NBR 15630 [67]  Resistividade elétrica Chlortest [68] / manual DURAR [69] / TC 154 RILEM[69]  Resistência à flexão e compressão NP EN 196-1 [63] / EN 1015-11 [70]

O planeamento detalhado do calendário com da uma das idades das campanhas de argamassas encontra-se no Anexo A.

### 3.2 Composição das argamassas

Num trabalho anterior [20] implementou-se um plano fatorial para otimizar argamassas auto-compactáveis com incorporação de FCC e para avaliar a influência de três parâmetros da composição –  $V_w/V_p$ ,  $w/c$  e  $Sp/p$  – nas seguintes propriedades: espalhamento, tempo de funil, velocidade de propagação de ultrassons, resistividade elétrica e resistência à compressão. Neste plano experimental fixaram-se os seguintes parâmetros de mistura  $f/c=0.20$  e  $V_s/V_m=0.475$ . Os restantes parâmetros da mistura considerados como variáveis independentes variaram nos seguintes intervalos:  $V_w/V_p=0.866-1.034$ ;  $w/c=0.406-0.574$  e  $Sp/p=1.78\%-2.12\%$ . Os resultados deste trabalho foram usados na obtenção de modelos matemáticos empíricos, que permitem otimizar a composição das argamassas em função das propriedades finais que se pretendam obter [20].

Neste TFM começou por se validar experimentalmente os modelos matemáticos obtidos no trabalho com as argamassas uma vez que estes modelos serão usados para definir a composição da pasta dos betões a preparar neste TFM. Assim, na prossecução deste objetivo, recorreu-se aos modelos matemáticos que relacionam o diâmetro de espalhamento, o tempo de passagem no funil, a resistividade elétrica (aos 56 dias) e a resistência à compressão (aos 90 dias) para determinar a composição da argamassa auto-compactável com incorporação FCC que conduz à maximização da resistividade elétrica aos 56 dias e a quantidade máxima de incorporação de resíduo FCC na argamassa. A Tabela 3-2 apresenta os valores dos parâmetros de composição da mistura obtidos em resultado desta otimização bem como os resultados das propriedades previstas pelos modelos matemáticos empíricos obtidos para as argamassas auto-compactáveis com incorporação de resíduo de FCC.

**Tabela 3-2 - Parâmetros de composição da mistura otimizada e resultados das propriedades previstos pelos modelos [20]**

	$V_w/V_p=0.88$ ; $w/c=0.45$ ; $Sp/p=1.95\%$				
	D (mm)	$t_r$ (s)	$\rho_{56d}$ (Ohm.m)	UPV, 90d (m/s)	$f_{cm,90d}$ (MPa)
<b>Valores Previsto</b>	250.0	6.75	139.1	4431.0	69.0
<b>IC<sub>95%</sub>*</b>	214.6-285.4	5.07-10.10	118.2-160.1	4312.4-4549.7-	61.6-76.3

\* IC<sub>95%</sub>-intervalo inferior e superior de predição com 95% de confiança

A validação experimental dos modelos matemáticos empíricos consistiu na preparação da argamassa com a composição otimizada (Tabela 3-3) – que se designou neste TFM por AO - e a comparação dos resultados experimentais das propriedades com os valores das mesmas propriedades previstas pelos modelos.

Dado que o trabalho experimental conducente à obtenção dos modelos numéricos foi realizado por outro operador e diferido no tempo em relação a este considerou-se pertinente repetir também a argamassa de composição central usada no trabalho anterior [20] para validação da reprodutibilidade dos resultados experimentais. Para este efeito preparou-se a argamassa que se designou neste trabalho AC.

Adicionalmente, preparou-se ainda uma argamassa com a mesma composição da argamassa com a composição otimizada, mas usando um procedimento de mistura diferente (secção 3.4.1) para avaliar a influência do procedimento de mistura nos resultados das propriedades. Esta argamassa designou-se AO\_pmm (argamassa otimizada com procedimento de mistura modificado).

A Tabela 3-3, identifica os parâmetros da composição otimizados para validação do modelo experimental das argamassas preparadas (secção 3.6).

**Tabela 3-3 - Identificação dos parâmetros da composição das argamassas**

	AC_exp*[20] e AC	AO e AO_pmm
<b>Vw/Vp</b>	0,95	0,88
<b>w/c</b>	0,49	0,45
<b>Sp/p</b>	1,95%	1,95%

AC\_exp\*: argamassa na qual foi obtido o modelo experimental (corresponde à composição central do plano fatorial aplicado e foi preparada no trabalho anterior [20]);

O volume de argamassa preparado teve em conta os ensaios no estado fresco que se previram realizar (secção 3.4.2), o número de amostras a moldar (6) para realizar os ensaios no estado endurecido e o desperdício de material. Efetuou-se a pesagem de cada um dos materiais utilizando uma balança eletrónica de exatidão  $\pm 1$  g.

Apresenta se na Tabela 3-4 a constituição mássica das argamassas em  $\text{kg/m}^3$ , para as duas composições de argamassas em estudo.

**Tabela 3-4 – Composição das argamassas em  $\text{kg/m}^3$**

Designação	Otimizada	Central
Abreviatura	AO e AO_pmm	AC
1. Cimento	545,88	521,76
2. FCC	147,65	147,06
3. Água	281,18	291,76
4. Superplastificante	15,88	14,71
5. Areia normalizada	1248,82	1248,82
6. Filer calcário	108,82	104,12

### 3.3 Materiais

Os materiais utilizados durante a campanha experimental deste TFM para a preparação das argamassas foram os seguintes:

- Materiais finos
  - Ligante hidráulico cimento Portland CEM I
  - Adição do tipo II, pozolânica – resíduo de FCC
  - Adição do tipo I, quase inerte - Fíler calcário
- Areia normalizada
- Superplastificante
- Água

O efeito da incorporação de cada um dos materiais foram descritos na secção 2.3. As informações presentes na ficha técnica que são referentes a constituição, características químicas, físicas, e mecânicas de alguns materiais são apresentadas no Anexo B.

#### 3.3.1 Materiais finos

##### 3.3.1.1 *Cimento Portland*

O ligante hidráulico utilizado neste TFM é constituído por cimento Portland CEM I 42,5 R (80%, em massa) e fíler calcário (20%, em massa) simulando a utilização do cimento composto CEM II Esta substituição cumpre os requisitos da especificação LNEC E 466 [71]. O cimento utilizado na campanha experimental foi o cimento Portland CEM I 42,5 R produzido pela empresa CIMPOR na fábrica de Alhandra. A classe de resistência média de compressão aos 28 dias de 42,5 MPa com alta resistência inicial. O cimento estava embalado em sacos de 25 kg.

Este cimento é constituído essencialmente por clínquer (superior a 95 %) e tem desempenho declarados segundo a NP EN 197-1 [38].

##### 3.3.1.2 *Fíler calcário*

O fíler utilizado durante a campanha experimental foi fornecido pela empresa CIARGA. As partículas do fíler calcário tem uma granulometria inferior à do cimento porque estas ocupam os vazios entre as partículas de cimento contribuindo para uma maior compactidade. Além de ser benéfico para as restantes propriedades do betão nomeadamente a trabalhabilidade, a permeabilidade e capilaridade.

### 3.3.1.3 Resíduo de FCC da refinação do petróleo

O resíduo de FCC foi utilizado neste TFM como um dos constituintes da argamassa. O resíduo de FCC é uma adição do tipo II – pozolânica e como referido na secção 2.3.1, este apresenta elevada atividade pozolânica como comprovado em trabalhos efetuados anteriormente [7], [8], [15], [20]. Este foi fornecido pela refinaria de Sines da empresa PETROGAL, S.A. A composição química e as propriedades físicas relevantes dos materiais finos são apresentadas na Tabela 3-5.

**Tabela 3-5 – Composição química e propriedades físicas do Cimento Portland, Fíler calcário e Resíduo de FCC [20]**

	Cimento Portland	Fíler calcário	Resíduo de FCC
<b>Composição química em massa (%)</b>			
<b>SiO<sub>2</sub></b>	19.41	0.97	40.30
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.45	0.29	54.45
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.23	0.14	0.45
<b>CaO</b>	62.57	55.31	0.06
<b>MgO</b>	1.91	0.20	0.15
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.89	0.05	0.00
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1.10	0.02	0.02
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.00	0.00	0.43
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.27	0.02	0.72
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.10	0.00	0.50
<b>Perda ao fogo (%)</b>	2.70	43.42	1.05
<b>Propriedades físicas</b>			
<b>Massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2980	2680	2690
<b>Dimensão média da partícula (µm)</b>	16.67	25.69	91.65

### 3.3.2 Agregados para argamassas

O agregado fino utilizado na preparação das argamassas foi a areia natural normalizada de forma arredondada certificada pela EN 196-1 [63] e conforme a ISO 679:2009 [72] produzida pela Société Nouvelle du Littoral com origem em Leucate, França. A areia estava acondicionada em sacos pequenos com uma massa 1350 ± 5 g.

### 3.3.3 Superplastificante

O adjuvante utilizado foi o superplastificante de elevado desempenho Sikaplast 898, é um forte redutor de água para betão. Tem uma massa volúmica de cerca de 1070 kg/m<sup>3</sup> e um teor de sólidos de cerca de 32 %. Este adjuvante melhora algumas propriedades do betão, nomeadamente, ao nível da fluidez, viscosidade e capacidade de passagem.

### 3.3.4 Água

A água utilizada na preparação das argamassas designada de água de amassadura é toda a água potável ou não, que não apresente cheiro nem sabor. A exigência destas características para a água é devida a sua influencia através das substâncias dissolvidas e em suspensão. A água utilizada foi água da rede pública de abastecimento de Lisboa, de acordo com as exigências da norma NP EN 206-1 [5] e pela NP EN 1008 [54].

## 3.4 Preparação e ensaio das argamassas

### 3.4.1 Procedimento de mistura para argamassas

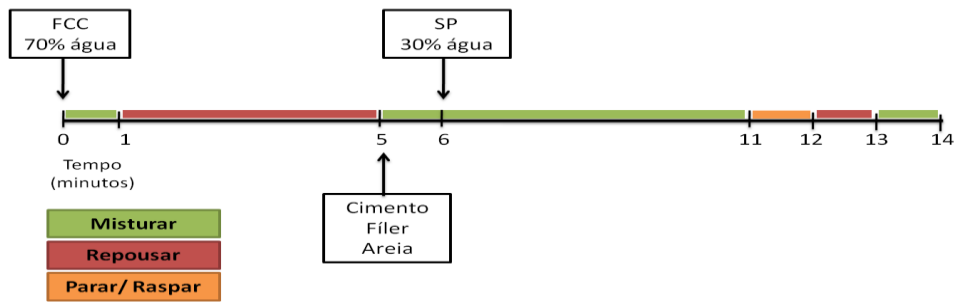
Na preparação das argamassas foram utilizados dois procedimentos de mistura que são os seguintes:

- O primeiro foi utilizado para a preparação das argamassas AO e AC.
- O segundo que designou se por *procedimento de mistura modificado* foi utilizado para a preparação da argamassa AO\_pmm.

O primeiro procedimento reproduz o procedimento de amassadura utilizado no trabalho anterior [20].

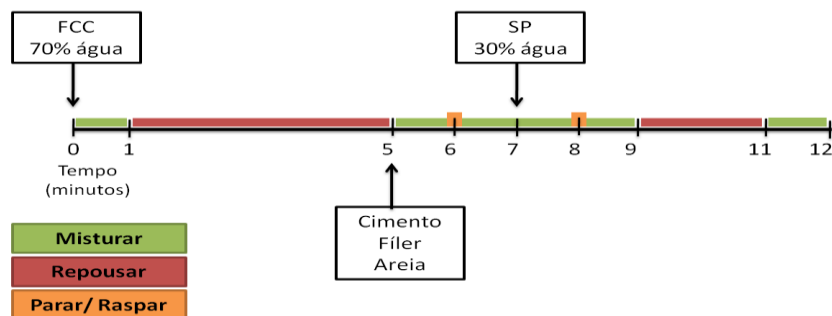
O segundo procedimento, o modificado de mistura, foi utilizado para avaliar a capacidade de absorção de água dos materiais, nomeadamente, dos finos em particular o resíduo de FCC no que concerne à trabalhabilidade bem como nas propriedades no estado endurecido.

A misturadora utilizada é da marca *Controls* com uma capacidade máxima de 5 litros e é normalizada com uma velocidade definida de acordo com a norma NP EN 196- 1 [63]. A velocidade utilizada na misturadora foi a velocidade lenta (140±5 rpm), designada nos seguintes procedimentos por v1. A pesagem dos materiais utilizados para a preparação das argamassas foi efetuada utilizando uma balança com a precisão de ± 0,01g. A mistura de água com o resíduo de FCC foi considerado o tempo de início do procedimento (0 minutos)



**Figura 3-1 – Procedimento de mistura da argamassa inicial**

A Figura 3-1 apresenta a sequência de mistura para o procedimento de mistura que foi o seguinte: a velocidade  $v_1$ , mistura-se o FCC e parte da água (70% da total) durante 1 minuto, a mistura repousa durante 4 minutos. Em seguida, adiciona-se o cimento, fíler e a areia e mistura-se durante 1 minuto, a seguir adiciona-se a água restante (30% da total) onde previamente se juntou o superplastificante e mistura-se durante 5 minutos. Descolam-se os materiais aderentes às paredes e pá com ajuda de uma colher durante 1 minuto, seguido de um repouso de mais 1 minuto. E, finalmente, mistura-se durante 1 minuto.



**Figura 3-2 – Procedimento de mistura modificada da argamassa**

A Figura 3-2 apresenta a sequência de preparação da mistura modificada que foi a seguinte: os primeiros 5 minutos são iguais ao primeiro procedimento. Em seguida, adiciona-se o cimento, fíler e a areia e mistura-se durante 1 minuto, a seguir descolam-se os materiais aderentes às paredes e pá com ajuda de uma colher muito rapidamente e retoma-se a mistura durante mais 1 minuto. A seguir adiciona-se a água restante (30% da total) onde previamente se juntou o superplastificante e mistura se durante 1 minutos. Repete-se a descolagem dos materiais muito rapidamente e retoma-se a mistura durante 1 minuto. Em seguida, repousa-se durante 2 minutos e finalmente mistura-se durante 1 minuto. Verificou-se para ambos os procedimentos se após a amassadura ocorria exsudação ou segregação da mistura.

### 3.4.2 Ensaios no estado fresco

Atualmente não existem normas nacionais ou internacionais para a avaliação das propriedades no estado fresco de argamassas auto-compactáveis, logo optou-se por seguir os procedimentos de ensaios adaptados de Okamura *et al* e de Nepomuceno que são usados correntemente nestas avaliações [24], [26], [36].

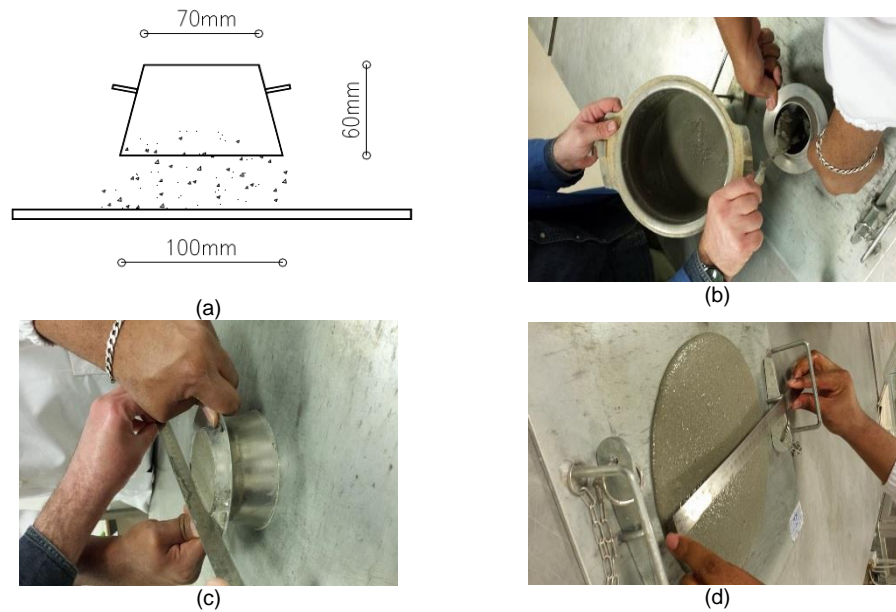
Os ensaios no estado fresco efetuaram-se após a preparação das argamassas seguindo sempre a mesma sequência: primeiro o ensaio de espalhamento seguido do ensaio de escoamento no mini funil V.

#### 3.4.2.1 *Ensaio de espalhamento no mini cone*

O ensaio de espalhamento com o molde tronco-cônico (Figura 3-3 (a)) destina-se a avaliar a deformabilidade através do diâmetro médio que é obtido pelas duas medições do espalhamento perpendiculares entre si, sendo que a primeira corresponde ao maior diâmetro.

O procedimento de realização do ensaio de espalhamento no mini cone é o seguinte:

- Garantir o nivelamento da mesa de ensaio
- Limpar e humedecer as superfícies (mesa e molde) em contato com a argamassa
- Encher o molde tronco-cônico com a argamassa de uma só vez, sem qualquer tipo de compactação (Figura 3-3 (b))
- Nivelar a superfície superior do molde (topo) e remover material a volta do molde (Figura 3-3 (c))
- Levantar de forma cuidadosa e contínua o cone na direção vertical
- Medir o espalhamento em dois diâmetros perpendiculares entre si (Figura 3-3 (d))

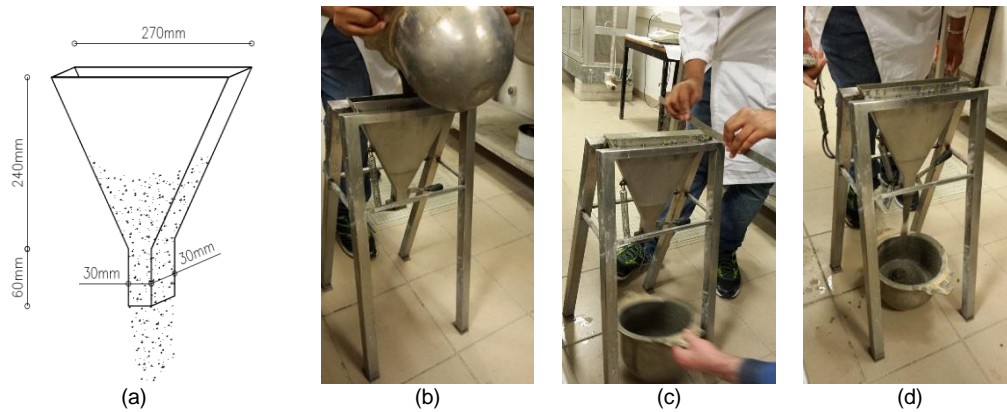


**Figura 3-3 – Ensaio de espalhamento no mini cone: (a) dimensões do molde [26] e sequência de execução (b) enchimento; (c) rasamento; (d) medição do diâmetro**

#### 3.4.2.2 Ensaios de escoamento no mini funil V

O ensaio com o mini funil V (Figura 3-4 (a)) destina-se a avaliar a fluidez através do tempo de escoamento no funil que é determinado a partir do momento em que se abre a abertura (base do funil) e a visualização de luz no fundo da abertura. Para o ensaio é utilizado um mini funil V conforme se apresenta na Figura 3-4(a). As condições necessárias para a realização deste ensaio foram as seguintes:

- Garantir o correto nivelamento, fixação do equipamento e fecho da comporta inferior
- Limpar e humedecer as superfícies (interior do funil) em contato com a argamassa
- Encher o funil de argamassa de forma contínua e sem qualquer tipo de vibração nivelou se a parte superior (Figura 3-4 (b) e (c))
- Abrir a comporta inferior e iniciar a contagem do tempo simultaneamente com o auxílio de um cronómetro. Observar o movimento pela parte superior e parar a contagem do tempo até visualizar o primeiro raio de luz no fundo do túnel (Figura 3-4 (d)).

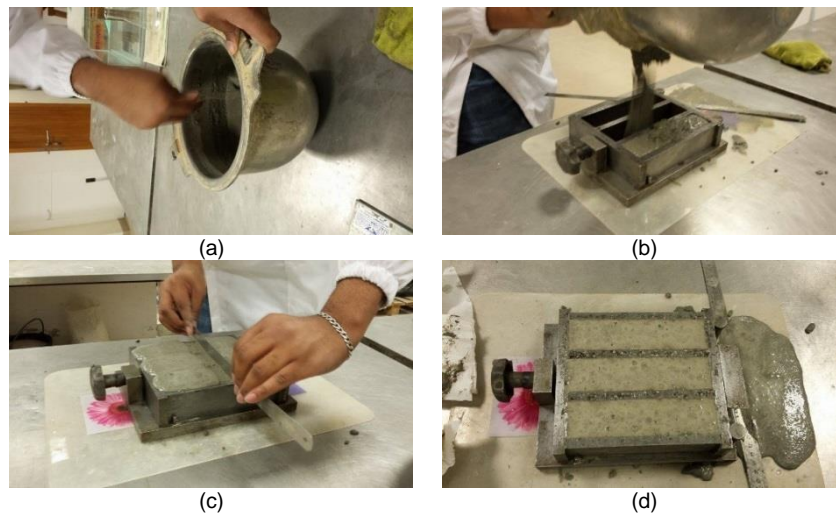


**Figura 3-4 – Ensaio de escoamento: (a)dimensões do mini funil V [26] e seqüência de execução (b) enchimento; (c)rasamento; (d)escoamento**

### 3.4.3 Moldagem, desmoldagem e condicionamento de amostras de argamassa

A moldagem, desmoldagem e o condicionamento de amostras tem em conta diversos fatores sendo que o condicionamento é muito influenciado pela parte logística da campanha experimental. Nesta fase seguiram-se os procedimentos da norma NP EN 196-1 [63] tendo o cuidado de não seguir os passos que impliquem a compactação. Após a preparação das argamassas e a execução dos ensaios no estado fresco descritos anteriormente, efetuou se a moldagem das amostras em moldes prismáticos com dimensões  $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ , segundo o seguinte procedimento adotado:

- Após a realização dos ensaios no estado fresco colocou-se novamente a argamassa no recipiente onde se prepara a mistura de modo a homogeneizar novamente a amassadura antes da preparação das amostras (Figura 3-5 (a))
- As amostras são preparadas despejando a argamassa diretamente no molde sem auxílio de qualquer vibração (Figura 3-5 (b))
- Efetua-se o rasamento e a remoção do excesso de material (Figura 3-5 (c) e (d)) e cobertura do molde com um plástico durante 24 horas.
- Após as 24 horas, efetua-se a desmoldagem das amostras tendo o cuidado de não as danificar, seguindo se a identificação e o armazenamento num tanque onde foram sujeitas a um processo de cura húmida por imersão em água numa câmara húmida com temperatura e humidade constantes.



**Figura 3-5 - Sequência de moldagem de amostras de argamassas: (a) mistura; (b) enchimento, (c) rasamento; (d) remoção do desperdício**

A caracterização dos ensaios a longo prazo é feita utilizando os ensaios não destrutivos e destrutivos. Os ensaios não destrutivos (velocidade de propagação de ultrassons e resistividade elétrica; aos 3, 7, 14, 21, 28, 56 e 90 dias de idade) foram realizados ao longo do tempo e servem para avaliar a durabilidade. Os ensaios destrutivos (resistência mecânica; aos 28 e 90 dias de idade) dada a sua natureza não permitem a reutilização das amostras e, por isso, foram efetuados depois dos não-destrutivos, além de em trabalhos desta natureza serem executados em datas discretas.

Moldaram-se 6 amostras de argamassas, de forma a dispôr de 3 amostras para as duas idades em que se realizaram os ensaios destrutivos. Além de que para a obtenção do valor médio são necessários 3 valores aleatórios.

#### 3.4.4 Ensaios no estado endurecido

Os ensaios no estado endurecido, efetuaram-se nas datas de ensaio definidas de acordo com o calendário experimental. A execução dos ensaios seguiu sempre a mesma sequência: ensaio de velocidade de propagação de ultrassons, ensaio de resistividade elétrica e os ensaios de resistência à flexão e resistência à compressão.

As amostras foram retiradas da água antes de serem ensaiadas e cobertas com um pano húmido até à execução do ensaio onde retirou se o excesso de água superficial. Os procedimentos utilizados para a avaliação das argamassas são os mesmos utilizados na avaliação dos betões (com exceção do ensaio de resistividade elétrica), apresentando algumas modificações tendo em conta as dimensões e geometria das

amostras. Os valores de cada uma das grandezas obtidas nestes ensaios resultam da média aritmética de ensaios obtidos em 3 amostras diferentes para cada uma das composições.

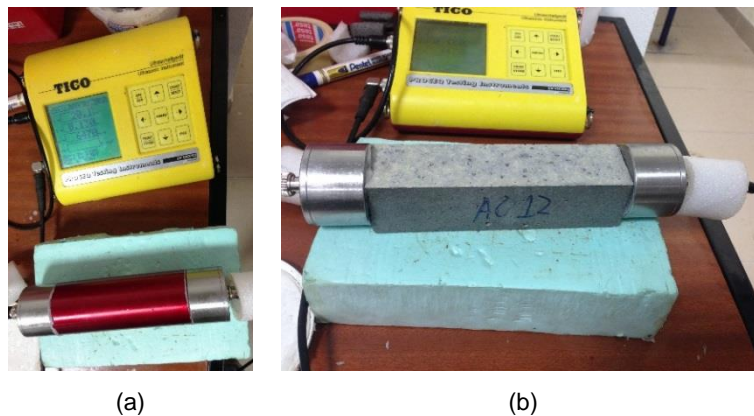
#### 3.4.4.1 Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de ultrassons permite determinar a velocidade de propagação de um impulso ultrassónico entre dois pontos da amostra num determinado tempo de percurso. Este impulso é gerado num ponto do elemento através de um transdutor emissor, a partir de um sinal elétrico, depois de atravessar o elemento o sinal é captado por um outro transdutor recetor, colocado num outro ponto, que o transforma novamente em sinal elétrico. O método utilizado é o método de transmissão direta onde a leitura é feita nas extremidades, de forma a atravessar o elemento. A superfície de contato deve ser lisa, e é utilizado uma massa de contato (vaselina) entre os transdutores e a superfície, de modo a melhorar a transmissão acústica. É necessário garantir que durante a leitura os transdutores (emissor e recetor) estão alinhados na mesma direção.

O equipamento utilizado é da marca *Proceq Testing Instruments*, modelo Tico Ultrasonic Instrument, com transdutores de 54 kHz de acordo com a Figura 3-6. Para a execução deste ensaio utilizaram-se a norma portuguesa NP EN 12504 [66] e a norte americana ASTM C597 [73]. O procedimento utilizado para a realização deste ensaio foi o seguinte:

- Efetuou-se a calibração do equipamento utilizando o cilindro de calibração com o comprimento  $L_{calib} = 0,13$  m até obter o tempo  $t_{calib} = 20,1$   $\mu$ s, (Figura 3-6 (a))
- Alteram-se as definições do equipamento para o comprimento da amostra ( $L_{argamassa} = 0,16$  m) e posicionou-se a amostra de modo a que a face de enchimento fique exposta na parte superior (topo) e a face da inscrição da amostra fique de frente ao operador, (Figura 3-6 (b) e (c))

Efetuuou-se a leitura e registo do tempo de percurso da onda ultrassónica.



**Figura 3-6 – Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons: a) calibração do equipamento; b) amostra de argamassa**

O tempo de percurso é medido eletronicamente na unidade de medida central, sendo assim possível calcular a velocidade de propagação, conforme a seguinte equação Eq. 3-1:

$$v = \frac{l}{t} \quad \text{Eq. 3-1}$$

Em que:

v – velocidade de propagação da onda ultrassónica (m/s)

l – comprimento da amostra ou distância entre os tradutores (m)

t – tempo de percurso da onda ultrassónica (s)

#### 3.4.4.2 Ensaio de resistividade elétrica

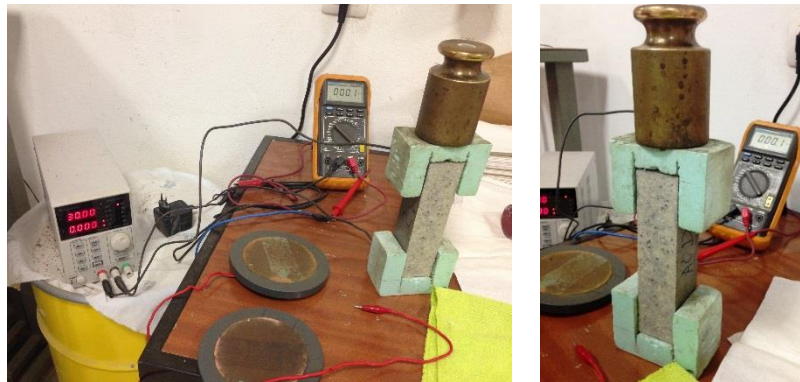
O ensaio de resistividade elétrica permite determinar a resistividade elétrica através da medição da intensidade de corrente mediante a imposição de uma determinada tensão ou diferença de potencial aplicada. A porosidade da microestrutura pode ser avaliada através da medição da resistividade elétrica, além do que esta também pode ser relacionada a difusão de cloretos. Com este parâmetro é possível aferir a durabilidade que é afetada pelos parâmetros da composição do BAC [57].

O equipamento utilizado para a execução deste ensaio é uma montagem que é constituída por uma fonte de tensão da marca *Velleman* e modelo P53005D onde são ligados os elétrodos e conseqüentemente ligados ao multímetro digital da marca *Goldstar* e modelo DM-9185 para a medição da intensidade de corrente elétrica conforme o esquema de montagem na Figura 3-7.

O método utilizado para a determinação da resistividade elétrica é o método dos dois elétrodos topo a topo. Esta técnica utiliza dois elétrodos, em contato com a superfície do provete, aplicando uma corrente elétrica e medindo-se a diferença de potencial [74]. Os elétrodos utilizados para as argamassas foram chapas retangulares de aço inox.

Na execução deste ensaio foram utilizadas a proposta de norma europeia apresentada pelo grupo Chlortest [68], bem como com manual DURAR [69] e a recomendação técnica TC 154 da RILEM [69]. O procedimento de ensaio adotado foi o seguinte:

- Aplicação de uma diferença de potencial de 30 volts em corrente contínua
- Colocação dos elétrodos nas extremidades da amostra. De modo a garantir, a passagem de corrente elétrica foi utilizada uma massa de 2 kg a comprimir o conjunto, conforme a Figura 3-7 para argamassas.
- Efetuou-se a leitura e registo da corrente elétrica



**Figura 3-7 – Ensaio de resistividade elétrica na amostra de argamassa**

A resistividade elétrica é obtida através do produto das razões entre a tensão aplicada e a intensidade de corrente ( $R=U/I$ , segundo a Lei de Ohm) e entre as dimensões da secção transversal e longitudinal de acordo com a seguinte equação Eq. 3-2:

$$\rho = \frac{U}{I} * \frac{A}{L} \quad \text{Eq. 3-2}$$

Em que:

$\rho$  – resistividade elétrica (Ohm.m)

U – tensão aplicada (V)

I – intensidade de corrente elétrica (A)

A – área da secção transversal da amostra (m<sup>2</sup>)

L – comprimento da amostra ou distância entre elétrodos(m)

### 3.4.4.3 Ensaio de resistência mecânica à flexão e à compressão

Os ensaios de resistência mecânica, à flexão e à compressão são utilizados atualmente para avaliar não só o comportamento mecânico a longo prazo.

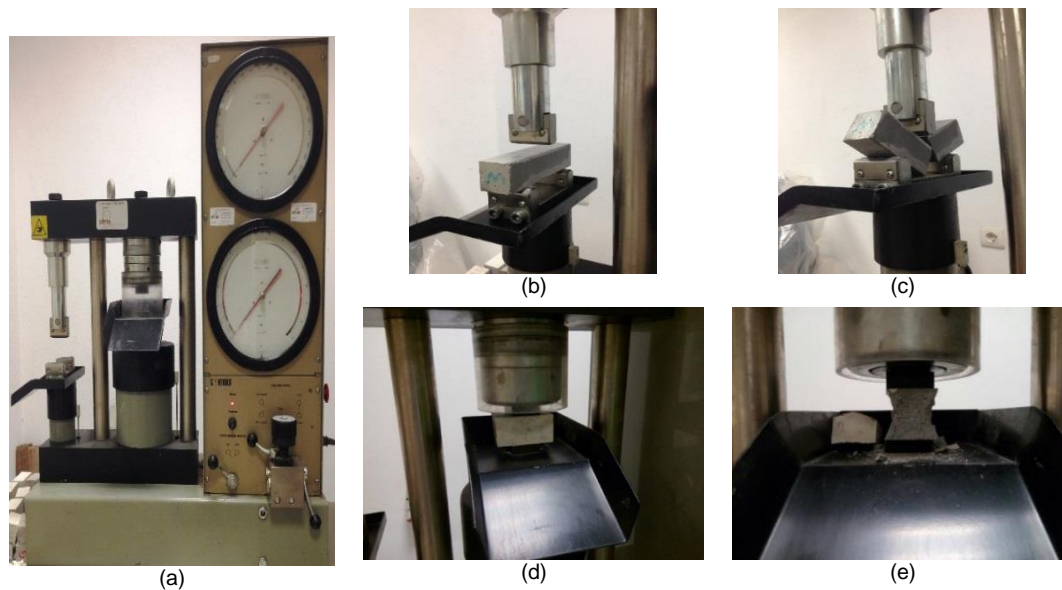
O ensaio consiste em aplicar uma carga (força) de forma gradual e crescente até a atingir à rotura. A primeira parte consiste em ensaiar as amostras à flexão que após a rotura resultam em duas metades sensivelmente iguais que serão utilizadas na segunda parte que consiste em ensaiar as amostras à compressão.

O equipamento utilizado para os ensaios de resistência mecânica em argamassas no ISEL é da marca *Controls* como apresenta-se na Figura 3-8 (a). Devido a questões de natureza técnica, parte dos ensaios de resistência mecânica das argamassas, nomeadamente, os ensaios de resistência à compressão foram efetuados no Laboratório de Materiais do Polo operacional da Teixeira Duarte no Montijo. Este laboratório é acreditado pelo Instituto Português de Acreditação IPAC para a realização deste ensaio [75]. O equipamento utilizado é semelhante ao do ISEL e é da marca *FORM+TEST Seidner*.

Os procedimentos utilizados para a execução destes ensaios foram os definidos na norma portuguesa e europeia, NP EN 196-1 [63] e EN 1015-11 [70], respetivamente. Sendo o procedimento adotado para o ensaio de resistência mecânica descrito a seguir.

- A primeira parte do procedimento correspondente a resistência à flexão é a seguinte:
  - Colocação e alinhamento da amostra com o eixo longitudinal perpendicular aos dois apoios inferiores metálicos (100 mm distância), tendo o cuidado de não colocar a face de enchimento em contato com os apoios, ou seja, na posição lateral devido a sua irregular superfície conforme apresentado na Figura 3-8 (b)
  - Efetua-se a descida do apoio superior metálico cutelo a meio vão até garantir o contato com a amostra
  - Aplicação de uma carga gradualmente crescente e contínua com uma velocidade de  $50 \pm 10$  N/s, até atingir a rotura da amostra, que dá origem a dois semi-prismas conforme apresentado na Figura 3-8 (c)
  - Leitura e registo do valor da força máxima de flexão aplicada
- A segunda parte do procedimento corresponde a resistência à compressão é a seguinte:

- Colocação da amostra devidamente centrada na placa do prato, tendo o mesmo cuidado em relação a face de enchimento tal como descrito na primeira parte do procedimento conforme a Figura 3-8 (d)
- Efetua-se a descida do prato superior até garantir o contato com a amostra
- Aplicação de uma carga gradualmente crescente e contínua com uma velocidade de  $2400 \pm 200$  N/s, até atingir a rotura da amostra, conforme apresentado na Figura 3-8 (e)
- Leitura e registo do valor da força máxima de compressão aplicada.



**Figura 3-8 - Sequência do ensaio de resistência mecânica em argamassas: a) equipamento; execução da flexão: b) posicionamento da amostra, c) rotura da amostra; execução da compressão: d) posicionamento da amostra, e) rotura da amostra**

O valor da tensão de rotura à flexão é dado pelo quociente do produto da carga máxima aplicada e a distância entre os apoios metálicos, com as dimensões laterais da amostra de acordo com a Eq. 3-4. E o valor da tensão de rotura à compressão é dado pelo quociente entre a força máxima aplicada e a área da secção transversal da amostra de acordo com a Eq. 3-3.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad \text{Eq. 3-3}$$

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * l}{A * d} \quad \text{Eq. 3-4}$$

Em que:

$R_f$  – resistência à flexão (N/mm<sup>2</sup> ou MPa)

$R_c$  – resistência à compressão (N/mm<sup>2</sup> ou MPa)

$F_c$  – força máxima de compressão aplicada (N)

$F_f$  – força máxima de flexão aplicada (N)

$A$  – área da secção transversal da amostra (mm<sup>2</sup>)

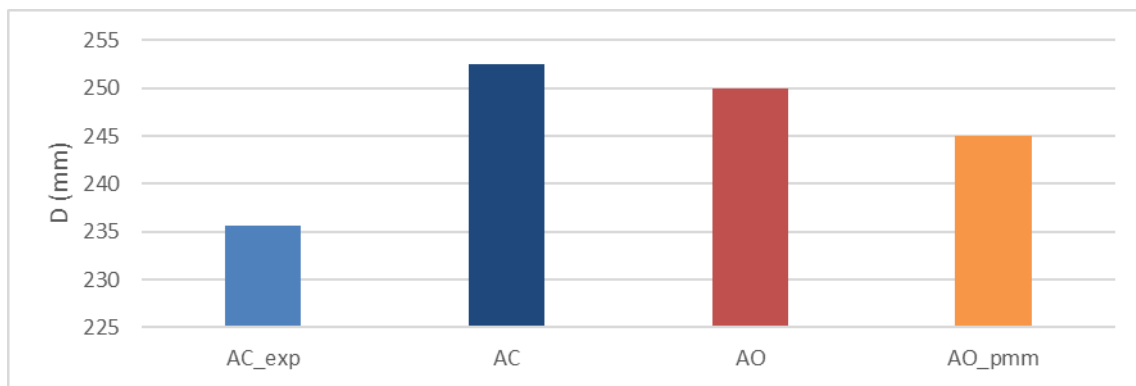
$l$  – distância entre apoios (mm)

$d$  – espessura da amostra (mm)

### 3.5 Resultados dos ensaios em argamassas

#### 3.5.1 Ensaios no estado fresco

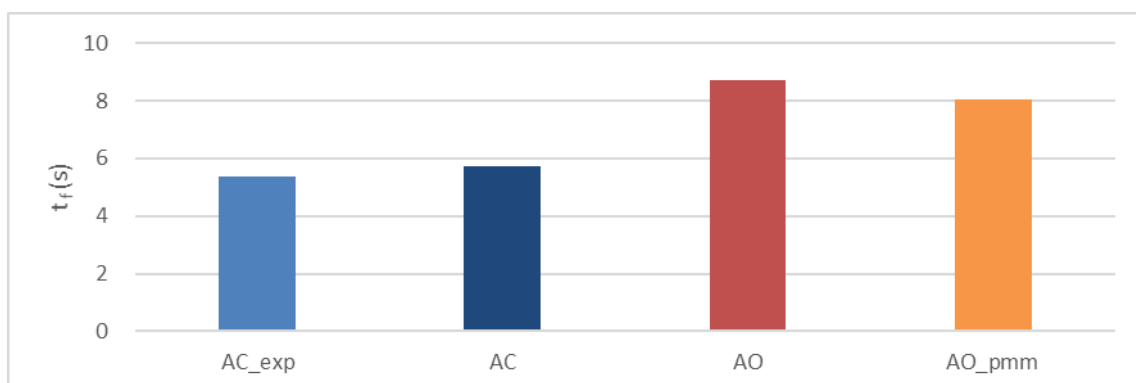
A Figura 3-9 apresenta os resultados dos ensaios de fluidez através da determinação do diâmetro de espalhamento,  $D$ (mm), (secção 3.4.2.1) das argamassas AC\_exp, AC, AO e AO\_pmm.



**Figura 3-9 - Diâmetro de espalhamento,  $D$  (mm), das argamassas AC\_exp [20], AC, AO e AO\_pmm**

Na análise da Figura 3-9, verifica-se que o diâmetro de espalhamento,  $D$ (mm), para todas as argamassas, situa-se entre 235,7 mm (AC\_exp) e 253 mm (AC). Em relação ao valor do diâmetro, verifica-se que a argamassa AC é cerca de 7% superior que a AC\_exp e para a argamassa o valor do diâmetro AO em relação à AO\_pmm é superior a 3%.

A Figura 3-10 apresenta os resultados dos ensaios de viscosidade através do tempo de funil,  $t_f$ (s), secção 3.4.2.2) das argamassas AC\_exp, AC, AO e AO\_pmm.

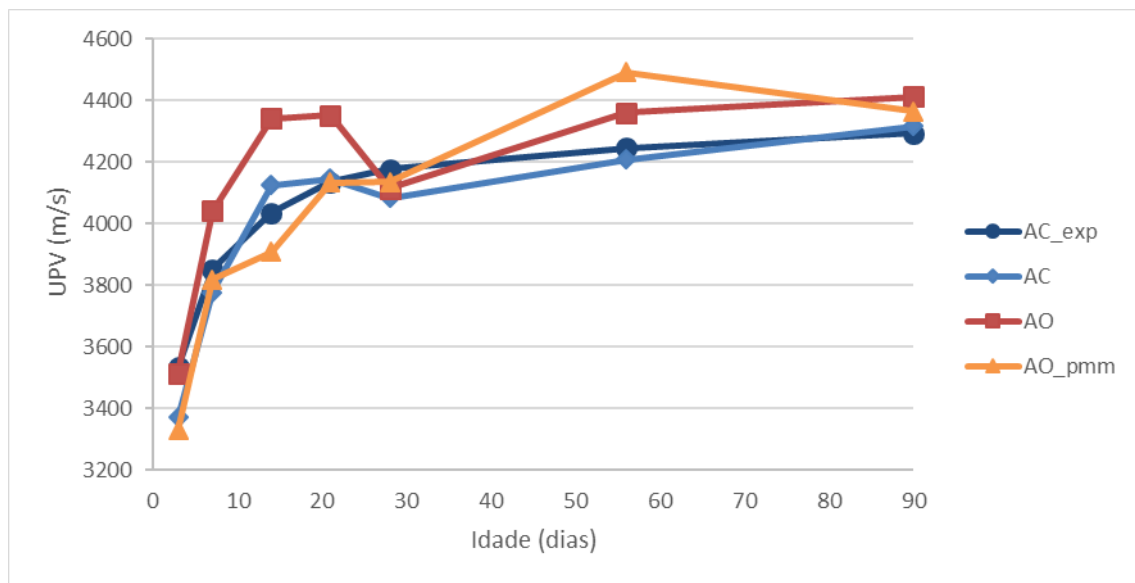


**Figura 3-10 – Tempo de funil,  $t_f$  (s), das argamassas AC\_exp [20], AC, AO e AO\_pmm**

Na análise da Figura 3-10, verifica-se que o tempo de funil,  $t_f$  (s), para todas as argamassas, situa-se entre 5,35 s (AC\_exp) e 8,75 s (AO). Em relação ao valor do tempo de funil, verifica-se que as argamassas AC é cerca de 7% superior que a AC\_exp e para a argamassa o valor do tempo de funil AO em relação à AO\_pmm é superior a 8%.

### 3.5.2 Ensaio no estado endurecido

A Figura 3-11 apresenta os resultados da velocidade de propagação de ultrassons, abreviadamente designado por UPV (m/s), (secção 3.4.4.1) das argamassas AC\_exp, AC, AO e AO\_pmm.

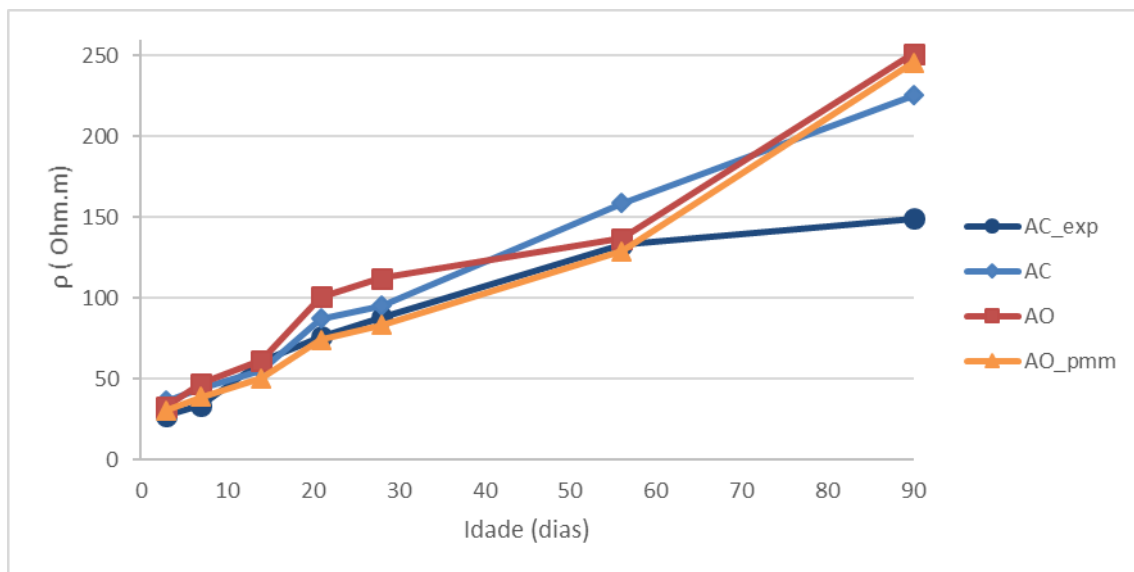


**Figura 3-11 - Velocidade de propagação de ultrassons, UPV(m/s), das argamassas AC\_exp [20], AC, AO e AO\_pmm ao longo do tempo de hidratação das argamassas**

Na análise da Figura 3-11, o UPV, apresenta uma tendência crescente ao longo do tempo para todas as argamassas como era esperado. No entanto, entre o 21 e 28 dias de idade ocorre uma inflexão, que é atribuída a erros experimentais, porque verificou-se que apesar de ser generalizado para todas as argamassas este é mais expressivo na argamassa AO. As causas prováveis deste erro poderão estar associadas a erros de natureza experimental (medição, equipamentos) ou de natureza humana.

O UPV ao longo do tempo da argamassa AC em relação à AC\_exp apresenta valores muito próximos. Em relação ao procedimento de mistura modificado da argamassa AO\_pmm, verifica-se que esta apresenta um valor de UPV até aos 28 dias menor em relação a argamassa AO. E até aos 90 dias estas apresentam valores muito próximos. É possível verificar a influência do procedimento nas primeiras idades.

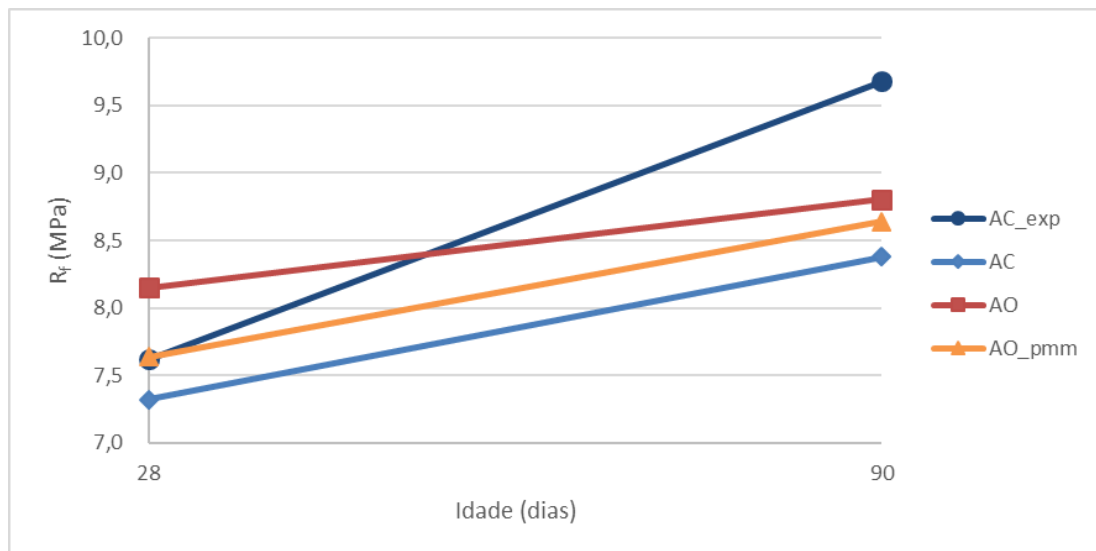
A Figura 3-12 apresenta os resultados da resistividade elétrica  $\rho$  (Ohm.m), (secção 3.4.4.2) das argamassas AC\_exp, AC, AO e AO\_pmm.



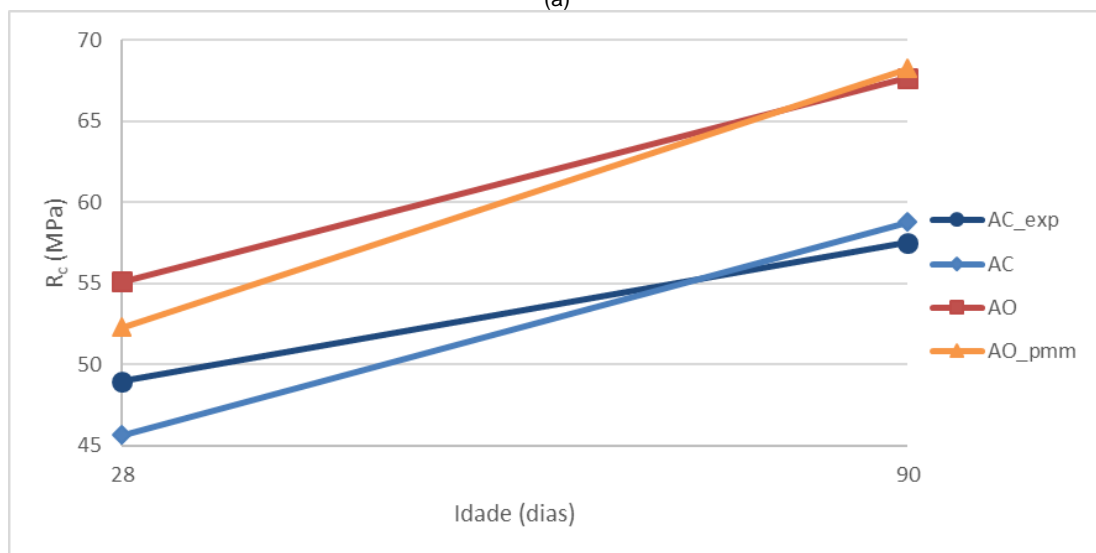
**Figura 3-12 - Resistividade elétrica (Ohm.m) das argamassas AC\_exp [20], AC, AO e AO\_pmm**

Na análise da Figura 3-12 verifica-se que a resistividade das argamassas AC e AC\_exp apresentam valores crescentes muito próximos até aos 56 dias, a partir deste período entre os 56 e 90 dias estas divergem sendo que a argamassa AC apresenta aos 90 dias um valor muito superior em cerca de 50% em relação a argamassa AC\_exp. Em relação ao procedimento de mistura modificado da argamassa AO\_pmm verifica-se que esta apresenta um comportamento semelhante a argamassa AO, no entanto o valor da resistividade da argamassa AO é sempre superior e entre o 56 e os 90 dias o comportamento crescente é semelhante.

A Figura 3-13, apresenta os resultados da resistência à flexão,  $R_f$  (MPa), Figura 3-13 (a) e da resistência à compressão,  $R_c$  (MPa), Figura 3-13(b), (secção 3.4.4.3) das argamassas AC\_exp, AC, AO e AO\_pmm.



(a)



(b)

**Figura 3-13 - Resistência mecânica: (a) flexão,  $R_f$  e (b) compressão,  $R_c$  das argamassas AC\_exp [20], AC, AO e AO\_pmm**

A partir da análise da Figura 3-13, constata-se que os valores das resistências mecânica à flexão e à compressão aos 90 dias de idade são superiores ao dos 28 dias de idade, apresentando deste modo o comportamento crescente que é esperado.

A Figura 3-13 (a), referente a resistência à flexão,  $R_f$ :

- A argamassa AC\_exp apresenta aos 28 dias um valor de resistência à flexão, superior em relação à AC, cerca de 10%. E apresenta aos 90 dias um valor superior em cerca de 50%
- A argamassa AO\_pmm apresenta aos 28 dias um valor de resistência à flexão inferior em relação à AO, cerca de 4% e apresenta um comportamento quase

semelhante e pelo que se constata que o procedimento de mistura apresenta pouca influência

A Figura 3-13 (b), referente a resistência à compressão,  $R_c$ :

- A argamassa AC\_exp apresenta um valor de resistência à compressão superior próximo em relação à AC, cerca de 2%. E apresenta aos 90 dias um valor quase semelhante
- A argamassa AO\_pmm apresenta um valor de resistência à compressão semelhante em relação à AO, apesar de inferior em cerca de 2%. O comportamento é crescente e o declive muito semelhante e verifica-se que o procedimento de mistura apresenta pouca ou nenhuma influencia na resistência à compressão

### 3.6 Validação do modelo experimental

A validação experimental dos modelos numéricos obtidos no trabalho anterior [20], e que se pretende usar neste TFM para estabelecer a composição da pasta do betões (argamassas), foi efetuada recorrendo à comparação dos valores experimentais com os previstos pelos modelos numéricos, (Tabela 3-2) para as propriedades diâmetro de espalhamento, tempo de funil, resistividade elétrica aos 56 dias, velocidade de propagação de ultrassons aos 90 dias, resistência à compressão aos 90 dias

A primeira verificação da validação do modelo experimental consistiu em avaliar a reprodutibilidade do operador e os materiais (secção 3.2), portanto a Tabela 3-6, apresenta a comparação dos resultados da argamassa AC que foram obtidos neste TFM e os resultados da argamassa AC\_exp [20].

**Tabela 3-6 - Comparação dos resultados das argamassas centrais**

Propriedades	D (mm)	$t_f$ (s)	$\rho_{56d}$ (Ohm.m)	UPV,90d (m/s)	$R_c,90d$ (MPa)
AC	252,5	5,75	158,7	4316,7	58,8
AC_exp[20]	235,7	5,35	133,1	4298,1	57,2

A comparação dos resultados da Tabela 3-6 referente aos resultados das argamassas AC e AC\_exp [44] apresentam de uma forma global valores semelhantes que variam até aos 10%, à exceção da resistividade elétrica aos 56 dias que apresenta uma variação de cerca de 19%. Deste modo confirma-se a reprodutibilidade do operador e dos materiais.

As verificações seguintes efetuadas nas argamassas otimizadas consistiram em validar a robustez do modelo experimental e influência do procedimento de mistura (secção 3.4.1). A Tabela 3-7 apresenta os resultados obtidos das argamassas otimizadas e os valores previstos pelos modelos numéricos (secção 3.2–Tabela 3-2) [44], que apresenta um intervalo de predição de 95% de confiança.

**Tabela 3-7 - Comparação dos resultados obtidos das argamassas otimizadas com os resultados previstos pelo modelo experimental [20]**

Propriedades	D (mm)	t <sub>f</sub> (s)	ρ <sub>56d</sub> (Ohm.m)	UPV <sub>90d</sub> (m/s)	R <sub>c,90d</sub> (MPa)
AO	250,0	8,70	137,0	4411,8	67,6
AO_pmm	245,0	8,03	128,9	4363,6	68,2
AO_prev mod* [20]	250,0	6,75	139,1	4431,0	69,0
IC <sub>95%</sub> [20]*	214,6; 285,4	5,07; 10,10	118,2; 160,1	4312,4; 4549,7	61,6; 76,3

AO\_prev mod\*: valores previstos pelos modelos numéricos obtidos no trabalho anterior [20] após otimização considerando os seguintes valores das variáveis independentes  $V_w/V_p = 0.880$ ;  $w/c = 0.45$  e  $S_p/p = 2.05\%$  segundo e respetivo intervalo de confiança (IC<sub>95%</sub>)

Os resultados obtidos das argamassas otimizadas AO e AO\_pmm estão dentro do intervalo de previsão com 95% de confiança e deste modo confirma-se a precisão dos modelos numéricos obtidos. O procedimento de mistura modificado que foi utilizado para verificar a influência do procedimento nas propriedades, através da capacidade absorção de água pelos materiais finos, nomeadamente, o resíduo de FCC (secção 3.3.1.3) apresenta pouca influência nas propriedades.

Esta validação permitiu passar à fase seguinte do estudo que é o estudo ao nível do betão.

## **4 ESTUDO DOS BETÕES**

### **4.1 Considerações iniciais**

Na segunda fase deste TFM, para o estudo ao nível do betão desenvolveu-se um plano experimental com base num plano fatorial aumentado, adotam-se como variáveis independentes apenas as relativas ao esqueleto sólido formado pelos agregados ( $V_g/V_{g,lim}$ , e  $V_s/V_m$ ), pois a composição da pasta manteve-se fixa, e igual à da argamassa otimizada testada no capítulo anterior.

Este capítulo tem uma estrutura análoga à do capítulo 3, em que se apresentam as composições dos betões estudados (secção 4.2), a identificação e caracterização dos agregados usados no estudo do betão (secção 4.3), os procedimentos de mistura e protocolos dos ensaios realizados no estado fresco e endurecido dos betões (secção 4.4); e os resultados respetivos (secção 4.5). O registo completo dos resultados dos betões é apresentado no anexo D.

A Tabela 4-1 apresenta uma sistematização dos ensaios experimentais realizados para betões, dos procedimentos de ensaio adotados e das secções deste documento onde os procedimentos de ensaio são apresentados com mais detalhe.

**Tabela 4-1 - Atividades e ensaios do programa experimental para betões**

<b>Betões</b>	
<b>Ensaio de caracterização dos agregados</b> (secção 3.3.2)	Propriedades gerais dos agregados NP EN 932-1 [76] Propriedades geométricas dos agregados NP EN 933-1 [77] / NP EN 933-2 [78] / NP EN 933-8 [79] / NP EN 12620 [52] Propriedades mecânicas e físicas dos agregados NP EN 1097-3 [80] / NP EN 1097-6 [81]
<b>Ensaio no estado fresco</b> (secção 4.4.2)	Espalhamento NP EN 12350-8 [32] Escoamento (Funil V) NP EN 12350-9 [33] Capacidade de passagem da caixa L NP EN 12350-10 [34]
<b>Moldagem, desmoldagem e condicionamento</b> (secção 4.4.3)	NP EN 196-1 [63] / NP EN 12390-1 [64] / NP EN 12390-2 [65]
<b>Ensaio no estado endurecido</b> (secção 4.4.4)	Velocidade de propagação de ultrassons NP EN 12504-4 [66] / ASTM C597-16 / NBR 15630[67] Resistência à compressão NP 12390-3 [82] / NP EN 196-1 [63]

A calendarização de todos os ensaios realizados ao nível do betão apresenta-se no Anexo A. E os resultados dos ensaios de caracterização de agregados encontra-se no Anexo B.

## 4.2 Composições dos betões

As proporções volumétricas dos materiais constituintes, por metro cúbico de betão corresponde à soma dos volumes dos seus constituintes<sup>7</sup>, que é dada pela formulação universal de composições, representada na equação (Eq 3.1).

$$V_s + V_g + V_p + V_w + V_a = 1m^3$$

**Eq. 4-1**

O cálculo das proporções volumétricas de cada um dos constituintes e restantes parâmetros é efetuado recorrendo à equação Eq. 4-1 considerando as seguintes variáveis de mistura:

- w/c- razão mássica água-cimento
- Vw/Vp - razão volumétrica água/finos
- Sp/p - razão mássica superplastificante/finos (%)
- f/c - razão mássica fíler-cimento
- Vs/Vm - razão volumétrica areia-argamassa
- Vg/Vg,lim - razão entre o volume compactado de agregado grosso/volume máximo de agregado grosso

Os valores w/c, Vw/Vp e Sp/p (%) utilizados foram os obtidos num trabalho prévio no processo de otimização da composição da argamassa (secção 3.2) e estão apresentados na Tabela 3-2. O valor de f/c= 0.20 foi adotado no referido trabalho anterior [20]. O valor de Va= 2% foi ajustado para este valor porque não se incluíram introdutores de ar e não se prevê exposição à ação de gelo-degelo [29]. A influência dos parâmetros de composição dos betões Vs/Vm e Vg/Vg,lim nas propriedades dos BAC com incorporação de FCC será objeto de estudo detalhado neste TFM e, por isso, serão adotadas como as variáveis independentes do plano fatorial de ensaios implementado (secção 3.3.1). Em concreto, estes parâmetros de mistura Vs/Vm e Vg/Vg,lim irão variar, respetivamente, entre 0,451-0,549 e 0,526-0,624 (secção 3.3.1).

O volume de agregado grosso e do volume de argamassas no betão é determinado recorrendo às Eq. 4-2 e Eq. 4-3, respetivamente

$$V_g = \frac{V_g}{V_{g,lim}} * V_{g,lim}(1 - V_a) \quad \text{Eq. 4-2}$$

<sup>7</sup> Volumes de agregado fino (Vs); agregado grosso (Vg); finos (Vp); água (Vw); ar (Va)

$$Vm^8 = 1 - Va - Vg \quad \text{Eq. 4-3}$$

$$\frac{Vs}{Vm} = \text{variável independente} \quad \text{Eq. 4-4}$$

- Determinação dos volumes de areia, água e dos materiais finos, Eq. 4-5, Eq. 4-6 e Eq. 4-7, respetivamente:

$$Vs = \frac{Vs}{Vm} * Vm \quad \text{Eq. 4-5}$$

$$Vw = 1 - (Va + Vg + Vm + Vs) \quad \text{Eq. 4-6}$$

$$Vp = \frac{Vm - Vs}{1 + \left(\frac{Vw}{Vp}\right)} \quad \text{Eq. 4-7}$$

As equações anteriores apresentam os parâmetros e as formulas utilizadas no cálculo dos volumes de cada um dos constituintes com a definição prévia de cada parâmetro da composição. A partir deste cálculo efetuou-se a conversão das proporções volumétricas para proporções mássicas para cada um dos constituintes dos betões [20] que são apresentados nas na secção 4.2. A descrição geral da formulação universal de composições é parte do trabalho desenvolvido no âmbito da investigação efetuada pela Professora Doutora Sandra Nunes no seu trabalho de doutoramento sobre dimensionamento de composições de betão auto-compactável [56].

Parte do método da definição da composição de BAC com o plano fatorial de experiências é baseado no método geral ou universal proposto originalmente por Okamura *et al* e pelo Método da EFNARC apresentados anteriormente na secção 2.4. Estes dois métodos foram considerados na comparação de parâmetros da composição em relação ao método estatístico (aplicado neste TFM).

Na Tabela 4-2 apresenta-se o intervalo dos parâmetros considerados em todos os métodos e os mais significativos em relação ao plano fatorial utilizado neste estudo:

---

<sup>8</sup> Volume de argamassa (Vm)

**Tabela 4-2 - Comparação de parâmetros da composição vs diferentes métodos**

	Método Okamura <i>et al</i>	Método EFNARC	Plano fatorial de experiências, CCD	
<b>w/c</b>	A definir dependendo dos critérios de desempenho	0,45-0,65 EN 206-1	0,45	
<b>Vw/Vp</b>	Determinação através de(ensaios prévios no estado fresco em argamassas	0,80-1,10	0,88	Argamassas
<b>Sp/p (%)</b>		Semelhante ao método Okamura <i>et al</i>	1,90	
<b>Va (%)</b>	4-7	~2	2	
<b>Vg/Vg,lim</b>	0,50 x (1-Va)	0,50-0,60	0,526-0,624	Betões
<b>Vs/Vm</b>	0,40	0,40-0,50	0,451-0,549	

#### 4.2.1 Plano de ensaios ao nível do betão

Para o estudo ao nível do betão desenvolvido neste TFM adotou-se um plano fatorial completo ( $2^2$ ) com 4 pontos fatoriais,  $F_i$ , ao qual foram adicionados 4 pontos axiais,  $CC_i$ , e 6 pontos centrais,  $C_i$ , tal como ilustrado na Figura 4-1, resultando num Plano Fatorial Aumentado (ou Central Composite Design (CCD) [83], na designação inglesa). Num CCD as variáveis são avaliadas em cinco níveis diferentes, que codificadas correspondem a  $-\alpha$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$ ,  $+\alpha$ . O valor de  $\alpha$ , é igual a  $n_F^{1/4}$ , em que  $n_F$  é o número de pontos fatoriais, logo neste estudo  $n_F = 4$  e  $\alpha = 1,414$  (ver Tabela 4-3). A correspondência entre os valores codificados nos níveis  $-\alpha$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$ ,  $+\alpha$  e os valores reais das variáveis independentes é apresentada na Tabela 4-4. A repetição do ponto central destinou-se a avaliar o erro experimental inerente à variabilidade das condições e procedimentos de ensaio. De modo a reduzir o número de experiências envolvidas, a relação  $s_1/s_2$  foi mantida constante e previamente definida tal como descrito na secção 4.3.1.

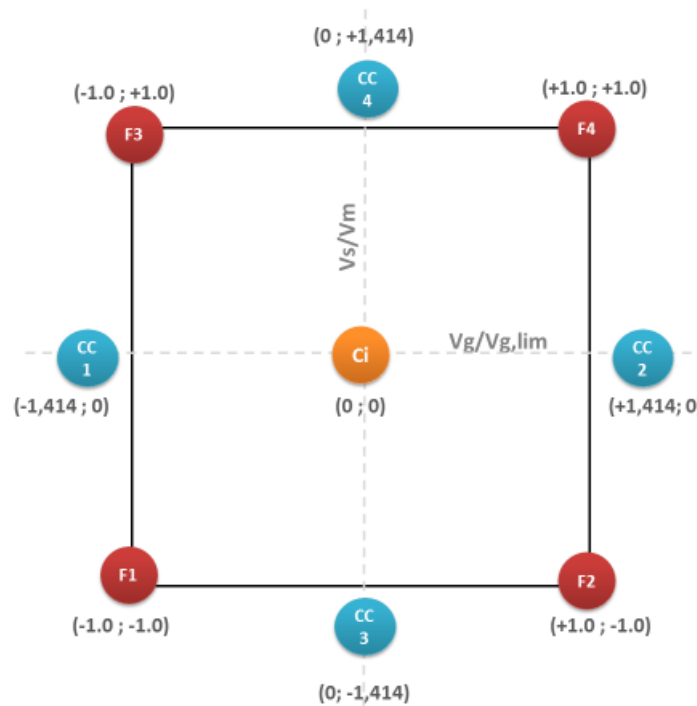


Figura 4-1 – Representação esquemática dos ensaios considerados no presente estudo (em valores codificados)

Tabela 4-3 - Plano experimental (valores codificados)

Designação	Central	Factorial				Central Composite			
Abreviatura	Ci	F1	F2	F3	F4	CC1	CC2	CC3	CC4
Vg/Vg,lim	0	-1	1	-1	1	-1,414	1,414	0	0
Vs/Vm	0	-1	-1	1	1	0	0	-1,414	1,414

Tabela 4-4 – Parâmetros da composição e correspondência entre valores codificados e reais de cada variável

Variáveis experimentais. (Independentes)	Eixo inferior (-1.414)	Inferior (-1)	Centro (0)	Superior (+1)	Eixo superior (+1.414)
Vg/Vg,lim	0,526	0,540	0,575	0,610	0,624
Vs/Vm	0,451	0,465	0,500	0,535	0,549

Com os valores considerados nas Tabelas 4.3 e 4.4 foram calculadas as composições exatas dos betões para cada um dos pontos do plano a ser testadas na campanha experimental que se apresentam na Tabela 4-5.

**Tabela 4-5 – Composição dos betões em kg/m<sup>3</sup>**

Designação	Central		Factorial				Central Composite			
	Abreviatura	Ci	F1	F2	F3	F4	CC1	CC2	CC3	CC4
1. Cimento		359,35	394,30	374,70	342,70	325,68	372,30	346,40	394,93	323,78
2. FCC		97,25	106,70	101,40	92,75	88,13	100,75	93,75	106,88	87,63
3. Água		196,08	213,18	203,95	187,58	179,63	202,18	190,00	213,73	178,43
4. Superplastificante		10,05	11,03	10,48	9,58	9,10	10,40	9,68	11,03	9,05
5. Areia 0/2		361,15	344,43	327,33	396,28	376,58	374,15	348,15	325,40	396,90
6. Areia 0/4		541,73	516,63	490,98	594,40	564,88	561,23	522,20	488,10	595,35
7. Brita 1		761,50	715,15	807,85	715,15	807,85	695,95	827,05	761,50	761,50
8. Filer calcário		71,88	78,85	74,95	68,55	65,13	74,45	69,28	78,98	64,75

### 4.3 Materiais

Os materiais utilizados para a preparação dos betões foram os mesmos utilizados para a preparação das argamassas (secção 3.3) com exceção dos agregados que serão apresentados nesta seção.

#### 4.3.1 Agregados para betões

Os agregados para betões foram caracterizados seguindo os procedimentos de ensaio descritos na norma NP EN 12620 [52]. Utilizaram-se os seguintes agregados para a realização dos ensaios de caracterização de agregados que são apresentadas na Tabela 4-6:

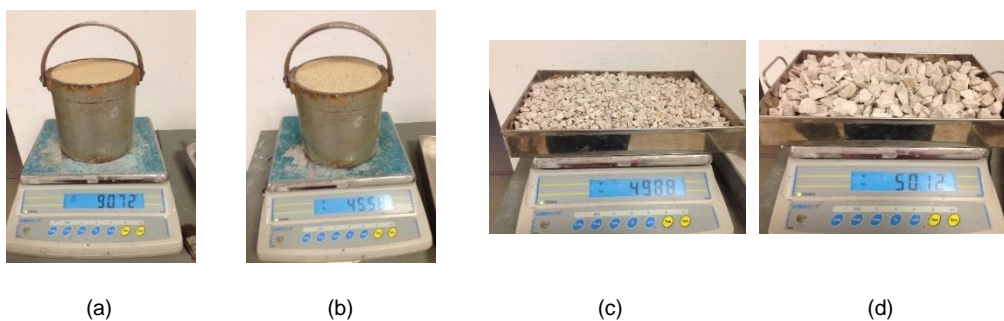
**Tabela 4-6 - Agregados utilizados na caracterização de ensaios de agregados**

Designação	Agregado fino		Agregado grosso	
	Areia 0/2	Areia 0/4	Brita 1	Brita 2
Origem	Herdade da Mesquita	Pinhal do Conde	Pedreira do Vale Grande nº2, Serra de Ota	
Fornecedor	Grupo SOARVAMIL		CIMPOR Alenquer	

O resultado das propriedades geométricas, mecânicas e físicas avaliadas nos ensaios a cada um dos agregados são obtidos a partir do cálculo da média aritmética de três amostras. Os procedimentos utilizados foram conforme as seguintes normas referentes a cada um dos ensaios:

- Determinação das propriedades gerais dos agregados
  - Métodos de amostragem (NP EN 932-1 [76])
- Propriedades geométricas dos agregados
  - Análise granulométrica, Método da peneiração (NP EN 933-1 [77])
  - Teor de finos, Ensaio de equivalente de areia (NP EN 933-8 [79])
- Propriedades mecânicas e físicas dos agregados
  - Baridade e do volume de vazios (NP EN 1097-3 [80])
  - Massa volúmica e da absorção de água (NP EN 1097-6 [81])

A Figura 4-2, apresenta o processo de pesagem de cada um dos agregados, procedimento utilizado para o ensaio de determinação da baridade dos agregados de acordo com o procedimento descrito na NP EN 1097-3 [80].



**Figura 4-2 - Pesagem de agregados: (a) areia 0/2, (b) areia 0/4; (c) brita 1, (d) brita 2**

A Tabela 4-7 e a Figura 4-3, apresentam, respectivamente, os valores obtidos em relação às propriedades dos agregados avaliadas bem como as curvas granulométricas de cada agregado e mistura de agregados.

Tabela 4-7 – Análise granulométrica dos agregados para betões

Abertura peneiro (mm)	Material passado acumulado (%)					
	Areia 0/2	Areia 0/4	Brita 1	Brita2	Mistura areias 40-60*	Mistura britas 60-40**
20	100	100	100	100	100	100
16	100	100	100	49,00	100	79,60
14	100	100	99,24	20,56	100	67,77
12,5	100	100	94,51	5,68	100	58,98
10	100	100	66,62	0,98	100	40,37
8	100	100	35,57	0,27	100	21,45
6,3	100	100	11,97	0,16	100	7,25
4	100	100	0,12	0,11	100	0,11
2	99,87	90,91	0,04	0,09	94,49	0,06
1,6	99,79	83,84	0,04	0,08	90,22	0,05
1,25	99,55	74,36	0,00	0,00	84,44	0,00
1	98,83	60,29	0,00	0,00	75,71	0,00
0,5	79,48	25,58	0,00	0,00	47,14	0,00
0,25	20,54	8,90	0,00	0,00	13,56	0,00
0,125	0,35	0,77	0,00	0,00	0,60	0,00
0,063	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Mistura areias 40-60\* – apresenta 40% de Areia 0/2 e 60% de Areia 0/4

Mistura britas 60-40\*\* – apresenta 60% de Brita1 e 40 % de Brita2

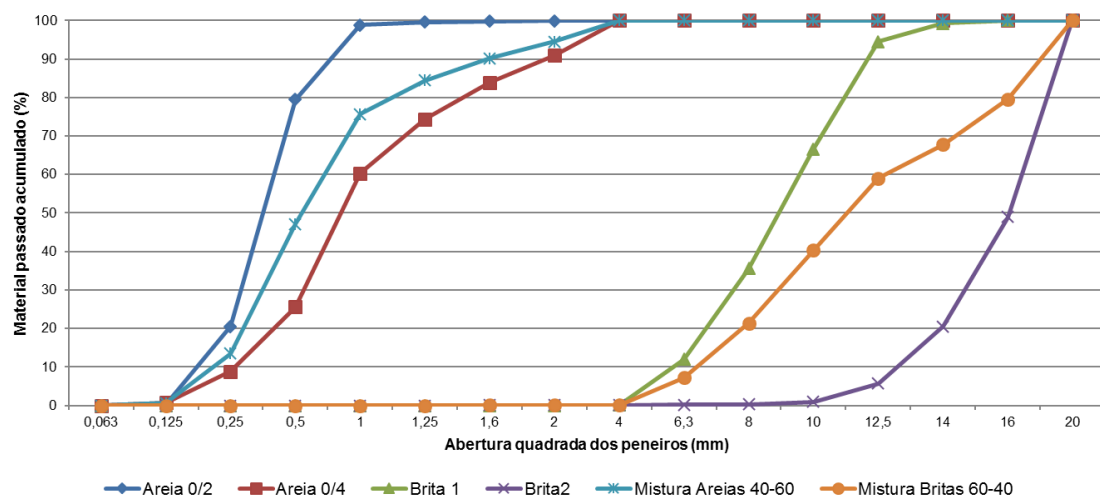


Figura 4-3 - Curva granulométrica dos agregados

Da caracterização de agregados, destacam-se a dimensão máxima (agregado grosso) em que se excluiu a Brita 2, a massa volúmica e a absorção de água, porque estas propriedades serviram para o cálculo da composição dos betões conforme apresentado

na secção 4.2. A relação entre as duas areias foi obtida através do ensaio de baridade avaliando a proporção entre ambas que conduzia a maior a compactidade da mistura.

No anexo B, apresenta-se o resumo dos resultados obtidos na caracterização dos agregados.

#### 4.4 Preparação e ensaios dos betões

##### 4.4.1 Procedimento de amassadura

O procedimento utilizado para a amassadura do betão foi baseado nos procedimentos utilizados para a argamassa com alguns ajustes tendo em conta o tempo de absorção de água dos diversos materiais nomeadamente pelo resíduo de FCC.

Na calendarização da preparação de cada uma das composições (Anexo A), introduziu-se a aleatoriedade devido as condicionantes apresentadas pelo plano fatorial. A composição Central que é a de referência porque apresenta os parâmetros de composição fixos e por isso é repetida 6 vezes neste TFM, foi efetuada intercaladamente e de forma distribuída ao longo de toda a campanha experimental porque serviu para comprovar experimentalmente a reprodutibilidade dos ensaios.

A misturadora utilizada para a preparação de betões é da marca *PROETI*, normalizada de acordo com a NP EN 206-1 [5], é uma misturadora de eixo vertical com capacidade máxima de 195 litros, conforme apresenta se na Figura 4-5 (a). A pesagem dos materiais utilizados para a preparação dos betões foi efetuada utilizando uma balança com a precisão de  $\pm 1g$ . A mistura de água com o resíduo de FCC foi considerado o tempo de inicio do procedimento (0 minutos)

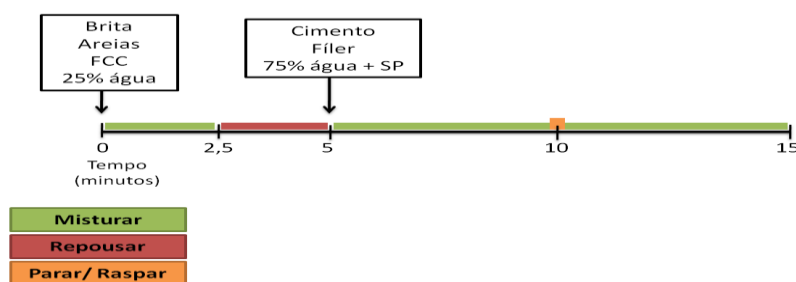
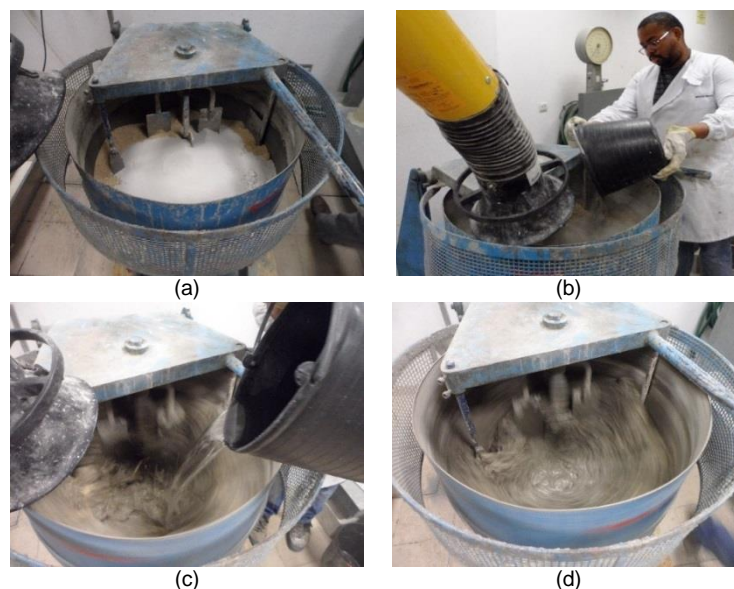


Figura 4-4 - Procedimento de amassadura do betão

A Figura 4-4 apresenta a sequência de amassadura para o procedimento de betão que foi a seguinte:

- Adicionar a brita, areia 0/4, areia 0/2, FCC e 25%, em massa, da água total (por esta ordem) e misturar a velocidade definida, durante 2,5 minutos, Figura 4-5 (a).
- Repousar a mistura durante 2,5 minutos.
- Adicionar o cimento, fíler e a água restante (75%, em massa, da total) onde previamente se juntou o superplastificante e misturar durante 5 minutos, Figura 4-5 (b) e (c)
- Interromper a mistura com a maior rapidez possível para destacar os materiais aderentes nas paredes da misturadora e nas respetivas pás com ajuda de uma colher
- Misturar durante mais 5 minutos.



**Figura 4-5 - Sequência de preparação do betão: (a) introdução dos agregados e resíduo de FCC; introdução de: (b)cimento, (c) parte de 25% da água total com Sp; (d) mistura**

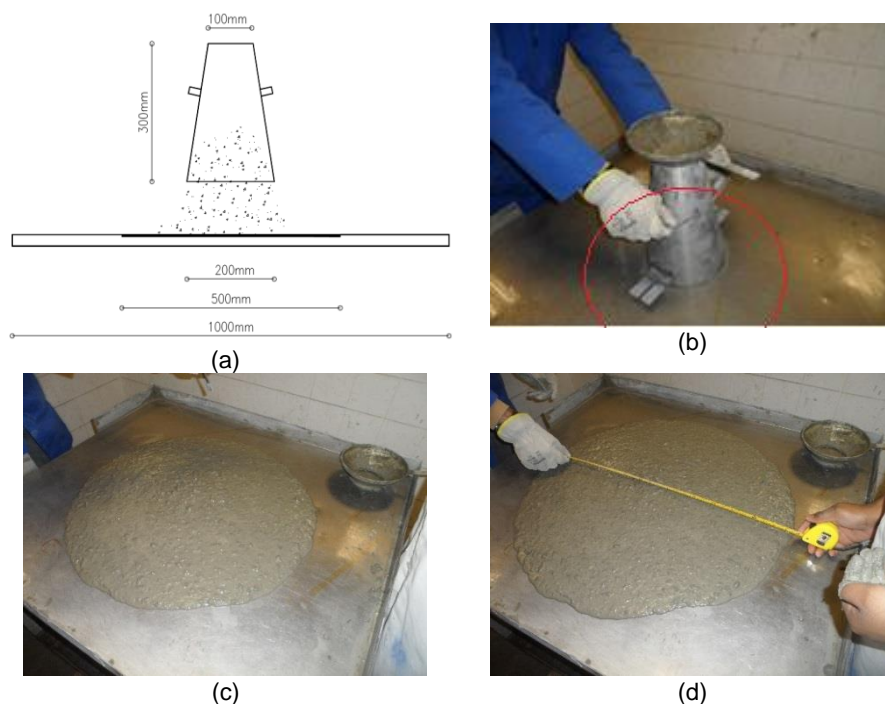
#### 4.4.2 Ensaios no estado fresco

Após a preparação do betão efetuaram-se os ensaios no estado fresco seguindo sempre a mesma sequência: ensaio de espalhamento, ensaio de escoamento no funil V e ensaio de capacidade de passagem na caixa L. Cada um destes ensaios foram avaliados segundo as normas europeias para betão auto-compactável e serão abordados de seguida.

#### 4.4.2.1 Ensaio de espalhamento

O procedimento experimental utilizado neste ensaio para a avaliação do espalhamento foi de acordo com o definido na norma NP EN 12350-8 [32].

O procedimento deste ensaio é semelhante ao realizado com as argamassas descrito na secção 3.4.2.1, diferindo para o betão apenas os utensílios (nomeadamente o cone de Abrams Slump) Figura 4-6 (a) e o registo do tempo ( $t_{500}$ , em segundos) em que o betão demora a atingir o diâmetro de 500 mm (representado a vermelho) Figura 4-6 (b) que é medido com um cronómetro desde o início do levantamento do cone até o diâmetro da área de betão atingir a circunferência. Após cessar o movimento do espalhamento regista-se o diâmetro de maior dimensão perpendicularmente Figura 4-6 (c) e (d).

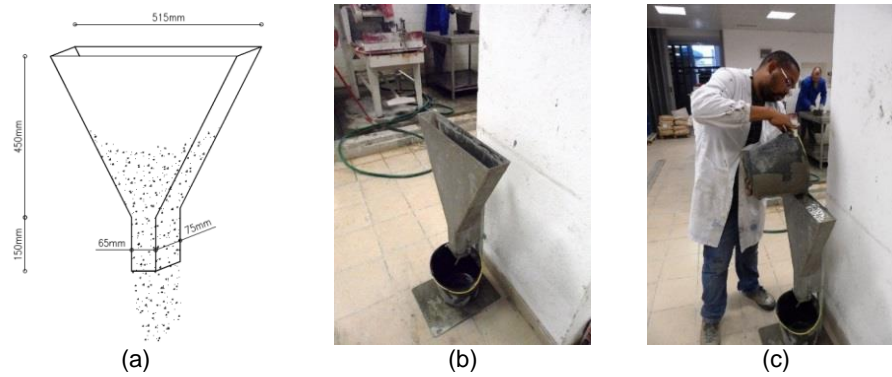


**Figura 4-6 – Ensaio de espalhamento: a) dimensões do cone [26]; sequencia de execução b) posicionamento; c) espalhamento; d) medição do diâmetro**

#### 4.4.2.2 Ensaio de escoamento no funil V

O procedimento experimental utilizado neste ensaio para avaliação do escoamento foi de acordo com o definido na norma NP EN 12350-9 [33].

O procedimento deste ensaio é semelhante ao realizado com as argamassas descrito na secção 3.4.2.2, diferindo para o betão apenas o utensílio (neste caso o funil V) Figura 4-7.



**Figura 4-7 – Ensaio de escoamento: a) dimensões do funil V [26]; b) posicionamento; c) enchimento**

#### 4.4.2.3 Ensaio de capacidade de passagem da caixa L

O ensaio de capacidade de passagem consiste na determinação de um índice que é a razão entre duas alturas das extremidades da caixa L, conforme se apresenta na Figura 4-8 (a).

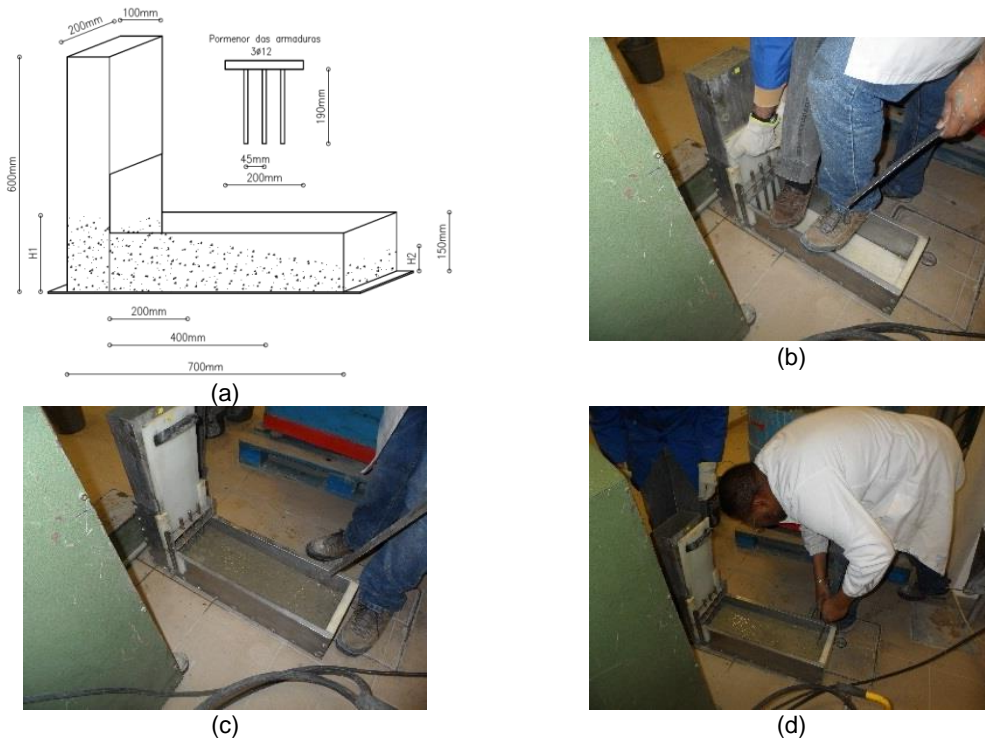
O procedimento experimental utilizado neste ensaio foi de acordo com o estabelecido a norma NP EN 12350-10 [34]. A razão é obtida através da medição do betão na coluna vertical ( $H_1$ ) e na extremidade da caixa ( $H_2$ ), em ambos os casos após cessar o movimento do betão. Como a dimensão máxima de agregado grosso (brita 1) é de 12 mm, foram utilizados 3 varões na execução deste ensaio.

Os valores do índice aceitáveis para classificação do BAC neste ensaio têm de ser no mínimo superiores a 0,80.

O procedimento de realização deste ensaio foi o seguinte:

- Garantir o correto nivelamento, fixação dos varões de aço e fecho da porta deslizante (sem obstruções).
- Limpar e humedecer as superfícies (interior da caixa) em contato com o betão.
- Encher a parte da coluna vertical sem compactar e rasa se a superfície da coluna (topo) e deixa se repousar durante 1 minuto Figura 4-8 (b).
- Abrir a porta deslizante e deixa se o betão fluir, quando cessar o movimento, Figura 4-8 (c).

Medir e registar as alturas na coluna vertical e na extremidade da caixa, desde o fundo da mesma até a superfície de betão, Figura 4-8 (d).



**Figura 4-8 – Ensaio de capacidade de passagem: a) dimensões da caixa L [26]; b) instante antes da abertura da porta deslizante; c) escoamento; d) medição da altura na extremidade**

#### 4.4.3 Moldagem, desmoldagem e condicionamento de amostras de betão

Semelhantemente às argamassas, nesta fase o procedimento é semelhante ao descrito nas argamassas, secção 3.4.3. Pelo que se apresenta aqui apenas a preparação, a organização e o tipo de amostras utilizadas para os ensaios no estado endurecido.

Na preparação de amostras foram tidos em conta diversos fatores, sendo que um dos mais condicionantes foi o número de amostras necessárias para a realização dos ensaios de resistência à compressão aos 28 e aos 90 dias de idade, visto que estes ensaios são destrutivos para as amostras.

As amostras de betão de cada um dos três conjuntos de composições, apresentou as seguintes designações:

- Central – Conjunto constituído por 6 composições idênticas que têm a designação “C1” até a “C6”;
- Factorial – Conjunto constituído por 4 composições diferentes que têm a designação “F1” até a “F4”;
- Axial – Conjunto constituído por 4 composições diferentes que têm a designação “CC1” até a “CC4”.

#### 4.4.4 Ensaios no estado endurecido

##### 4.4.4.1 *Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons*

O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons foi efetuado em amostras cúbicas destinadas ao ensaio de resistência à compressão aos 90 dias. O método e o procedimento deste ensaio são semelhantes ao realizado com as argamassas descrito na secção 3.4.4.1, diferindo para o betão apenas a geometria da amostra, que apresenta 150 mm de aresta.

##### 4.4.4.2 *Ensaio de resistência à compressão*

O ensaio de resistência à compressão tal como nas argamassas tem como objetivo avaliar a capacidade resistente dos diversos betões produzidos, quando sujeitos a uma tensão uniforme de compressão. Para tal, submetem-se os provetes até à rotura e regista-se a força máxima de compressão aplicada a que resistem.

O equipamento utilizado é uma prensa servo controlada que é constituída por um computador com software específico, sistema hidráulico da marca *Sangari* e a prensa de compressão marca *FORM+TEST Seidner*, com uma capacidade máxima de 3000 kN conforme apresentado na Figura 4-9 (a) e Figura 4-9 (b), respetivamente.

Os procedimentos utilizados para a execução destes ensaios foram os definidos nas normas portuguesas NP EN 196-1 [63] e NP EN 12390-3 [82]. Sendo o procedimento adotado para o ensaio de resistência mecânica descrito o seguinte:

- Colocação e alinhamento da amostra em relação ao cilindro central, tendo o cuidado de não colocar a face de enchimento em contato com as bases, ou seja, na posição lateral devido a sua irregular superfície conforme apresentado na Figura 4-9 (b)
- Aplicação de uma carga gradualmente crescente e contínua com uma velocidade de 13200 N/s, até atingir a rotura da amostra, conforme apresentado Figura 4-9 (c)
- Leitura e registo do valor da força máxima de compressão aplicada



(a)



(b)

**Figura 4-9 - Ensaio de resistência à compressão: equipamento a) computador e sistema hidráulico, b) prensa;**

O valor da tensão de rotura à compressão é dado pelo quociente entre a força máxima aplicada e a área da secção transversal da amostra de acordo com a equação Eq. 4-8:

$$f_{cm} = \frac{F_c}{A} \quad \text{Eq. 4-8}$$

Em que:

$f_{cm}$  – resistência à compressão (N/mm<sup>2</sup> ou MPa)

$F_c$  – força máxima de compressão aplicada (N)

$A$  – área da secção transversal da amostra (mm<sup>2</sup>)

#### 4.5 Resultados dos ensaios no betão

A preparação dos betões só foi possível após as 3 verificações da validação do modelo experimental (secção 3.6). A otimização da pasta do betão resultou na fixação dos parâmetros da composição definidos no trabalho anterior [44]  $w/c=0,45$ ;  $V_w/V_p=0,88$ ; e  $S_p/p=0,49\%$ . Os parâmetros da composição em estudo no betão foram  $V_g/V_{g,lim}$  e  $V_s/V_m$  que variaram, respetivamente, entre 0,526-0,624 e 0,451-0,549.

Depois da apresentação geral dos resultados de cada uma das propriedades em estudo, os resultados são analisados tendo em conta a variação dos parâmetros da composição  $V_g/V_{g, lim}$  e  $V_s/V_m$  para o efeito os resultados do betão no estado fresco são classificados segundo as classes de consistência definidas na norma portuguesa NP EN 206-9 [37] (secção 4.5.1.1) e as idades das propriedades do estado endurecido escolhidas foram aos 28 e aos 90 dias (secção 4.5.2.1) porque são as idades de referência para avaliação de trabalhos desta natureza. Na análise dos resultados a representação é feita através de medidas de localização e dispersão.

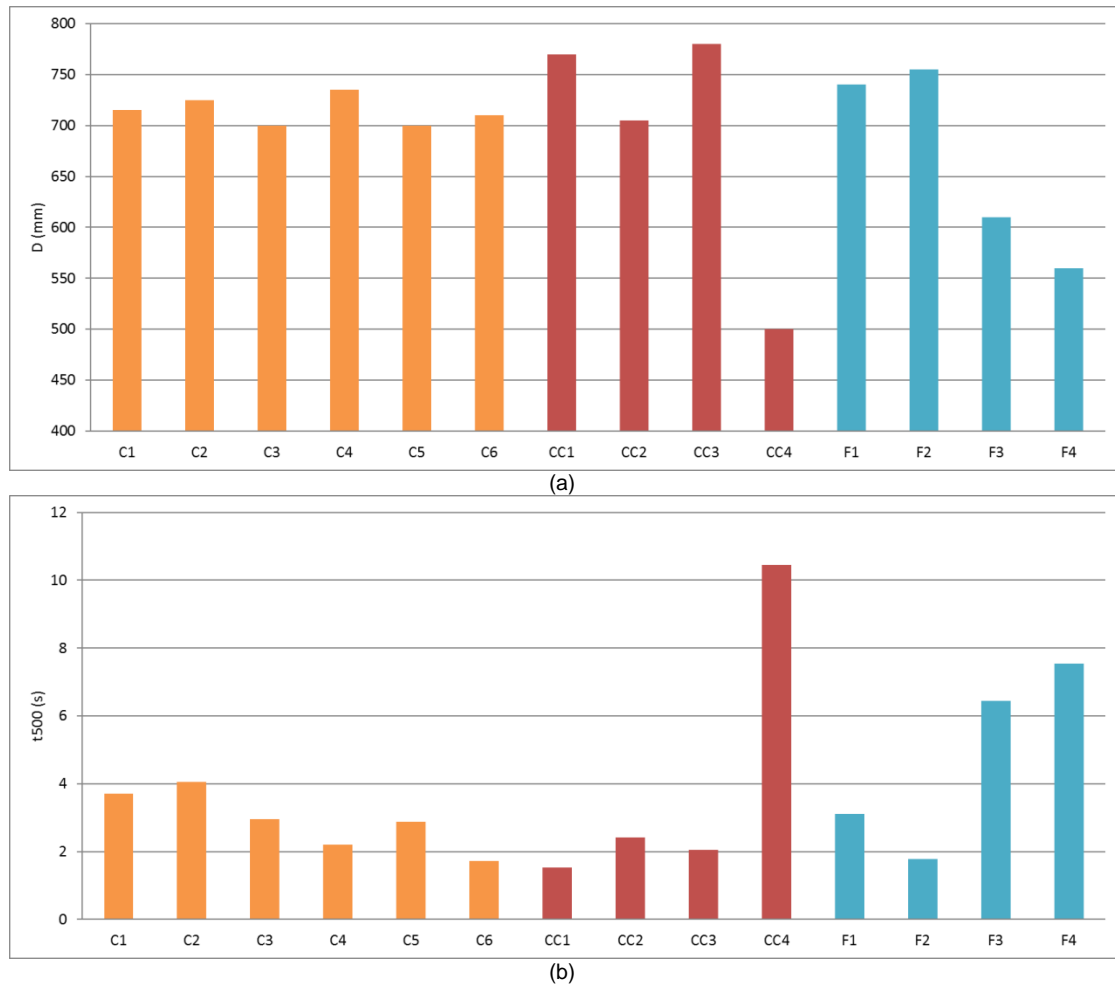
A ordem de apresentação dos resultados dos betões, para uma leitura clara será feita através dos seguintes conjuntos cuja notação advém dos termos em inglês na área da metodologia experimental (secção 4.2.1):

- *Central* –  $C_i$
- *Factorial* –  $F_i$
- *Axial* –  $CC_i$ .

A experiência correspondente ao ponto central foi repetida 6 vezes para avaliar o erro experimental inerente à variabilidade das condições e procedimentos de ensaio

#### 4.5.1 Ensaios no estado fresco

A Figura 4-10, apresenta os resultados do diâmetro de espalhamento,  $D$  (mm), e do tempo que o material demora a alcançar um diâmetro de 500mm,  $t_{500}$  (s), (secção 4.4.2.1), no ensaio de espalhamento para todas as composições de betões.



**Figura 4-10 – Ensaio de espalhamento: (a) Diâmetro,  $D$  (mm); (b) Tempo do diâmetro 500 mm,  $t_{500}$  (s); do conjunto de betões: C, F e CC**

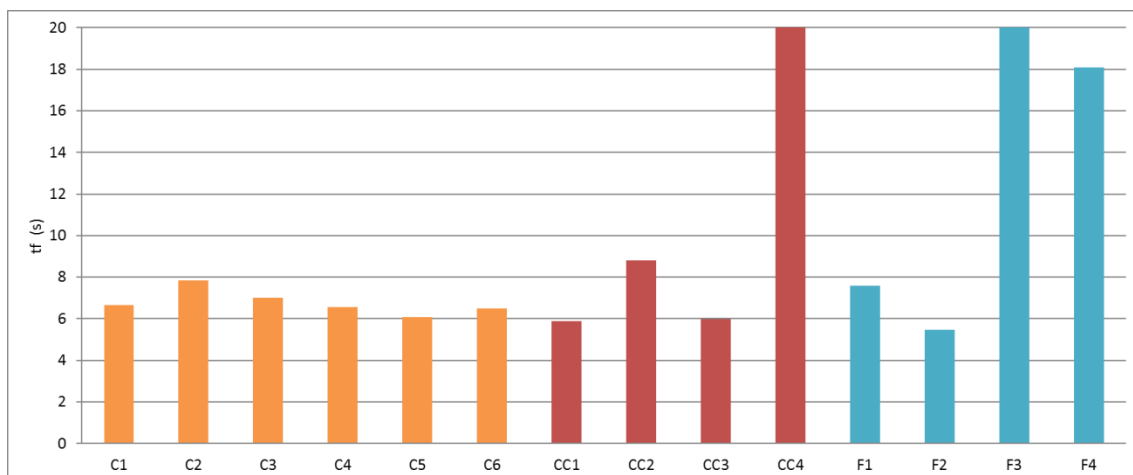
Na análise da Figura 4-10 (a), o valor do diâmetro, para todas as composições de betões é igual ou superior a 500 mm e inferior a 800 mm, e para cada um dos conjuntos verifica-se o seguinte:

- Central: o valor médio de todas as composições é de 714 mm.
- Factorial: o menor valor é de 560 mm (F4) e o maior é de 755 mm (F2).
- Axial: o menor valor é de 500 mm (CC4) e o maior é de 780 mm (CC3).

Na análise da Figura 4-10 (b), o valor do  $t_{500}$ , para todas as composições de betões situa-se entre 1 e 11 segundos, e para cada um dos conjuntos verifica-se o seguinte:

- Central: o valor médio de todas as composições é de 2,92 segundos.
- Factorial: o menor valor é de 1,78 segundos (F2) e o maior é de 7,55 segundos (F4).
- Axial: o menor valor é de 1,54 segundos (CC1) e o maior é de 10,45 segundos (CC4).

A Figura 4-11 apresenta os resultados obtidos para o tempo de escoamento no funil em forma de V,  $t_f$  (s) (secção 4.4.2.2), para todas as composições de betões. Para uma melhor apresentação e leitura dos resultados, limitou-se o eixo vertical do gráfico, porque os valores do tempo de funil no funil-V da composição Composite Central (CC4), é 104,5 segundos e distorcer o gráfico.

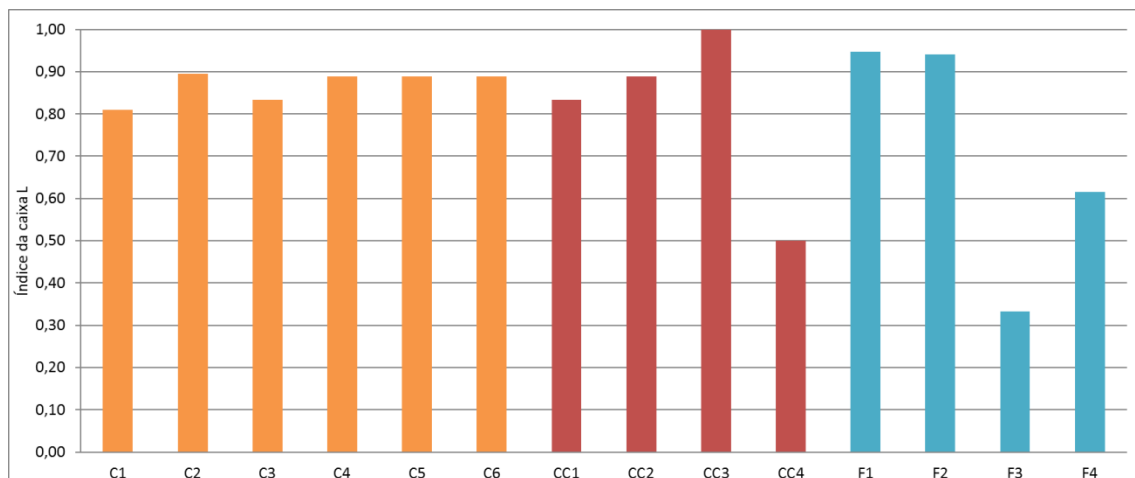


**Figura 4-11 – Tempo de funil,  $t_f$  (s) do conjunto de betões: C, F e CC**

Na análise da Figura 4-11, o valor do tempo de escoamento no funil V,  $t_f$  (s), para todas as composições de betões situa-se entre os 5 e os 105 segundos. Para cada um dos conjuntos verifica-se o seguinte:

- Central: o valor médio de todas as composições é de 6,77 segundos.
- Factorial: o menor valor é de 5,48 segundos (F2) e o maior é de 27,30 segundos (F3).
- Axial: o menor valor é de 5,88 segundos (CC1) e o maior é de 104,5 segundos (CC4).

A Figura 4-12, apresenta os resultados obtidos no ensaio de capacidade de passagem para o índice da caixa L, (secção 4.4.2.3), para todas as composições de betões.



**Figura 4-12 - Índice de capacidade de passagem da caixa L, do conjunto de betões: C, F e CC**

Na análise da Figura 4-12, o valor do índice de capacidade de passagem da caixa L é igual ou superior a 0,33 e inferior a 1,00. Para cada um dos conjuntos, verifica-se o seguinte:

- Central: o valor médio de todas as composições é de 0,87
- Factorial: o menor valor é de 0,33 (F3) e o maior é de 0,95 (F1)
- Axial: o menor valor é de 0,5 (CC4) e o maior é de 1,00 (CC3)

As composições Factorial (F3) e Composite Central (CC4) apresentaram resultados condicionantes em todos os ensaios no estado que poderão estar relacionados aos parâmetros da composição  $V_g/V_{g,lim}$  e  $V_s/V_m$ , respetivamente, F3 (0,520; 0,510) e CC4 (0,555; 0,524). Ou seja, verifica-se que o parâmetro  $V_s/V_m$  influencia os resultados das propriedades dos ensaios no estado fresco.

#### 4.5.1.1 *Resumo geral dos resultados no estado fresco*

A Tabela 4-8 apresenta, a classificação dos resultados do betão no estado fresco em classes de consistência definidas segundo a norma portuguesa, NP EN 206-9 [37].

**Tabela 4-8 – Resultados dos ensaios de betões no estado fresco e respetiva classificação por classes segundo NP EN 206-9 [37]**

Composições	Parâmetros da composição		Espalhamento		Viscosidade		Viscosidade		Passagem	
	Vg/Vglim	Vs/Vm	D (mm)	Classe	t <sub>500</sub> (s)	Classe	t <sub>f</sub> (s)	Classe	Caixa L	Classe
<b>C (média)</b>	0,575	0,500	714	SF2	2,9	VS2	6,8	VF1	0,9	PL2
<b>CC1</b>	0,526	0,500	770	SF3	1,5	VS2	5,9	VF1	0,8	PL2
<b>CC2</b>	0,624	0,500	705	SF2	2,4	VS2	8,8	VF1	0,9	PL2
<b>CC3</b>	0,575	0,451	780	SF3	2,1	VS2	6,0	VF1	1,0	PL2
<b>CC4</b>	0,575	0,549	500	SF1	10,5	VS2	104,5	-	0,5	-
<b>F1</b>	0,540	0,465	740	SF2	3,1	VS2	7,6	VF1	0,9	PL2
<b>F2</b>	0,610	0,465	755	SF2	1,8	VS2	5,5	VF1	0,9	PL2
<b>F3</b>	0,540	0,535	610	SF1	6,5	VS2	27,3	-	0,3	-
<b>F4</b>	0,610	0,535	560	SF1	7,6	VS2	18,1	VF2	0,6	-

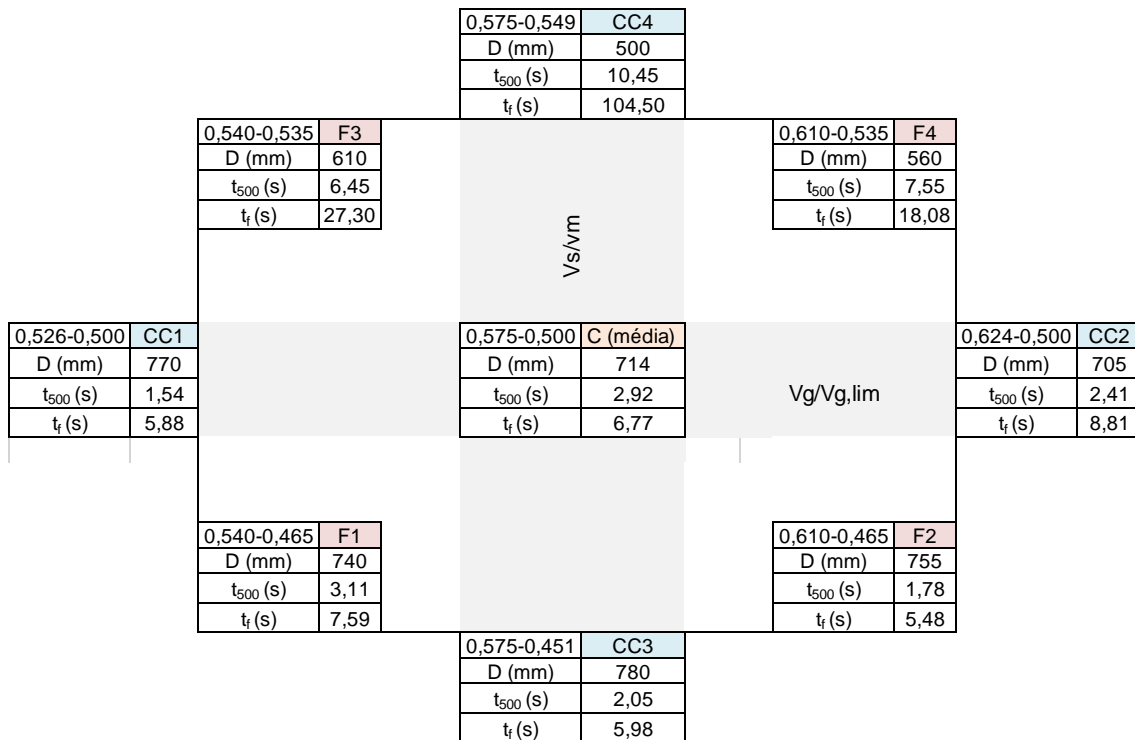
De acordo com a classificação feita pela norma portuguesa NP EN 206-9 [37] em relação as classes de consistências:

- A maior parte das composições apresenta classe de espalhamento SF2 e que apenas a composição CC3 apresenta classificação SF3 e que as restantes (F3, F4 e CC4) apresentam SF1.
- Quanto a classe de consistência de espalhamento por viscosidade a maior parte é classificada como VS2 e apenas as composições (CC1 e F2) são de classe VS1. Destaca-se ainda que o conjunto das composições CCi apresenta todas as classes de espalhamento, uma vez que a a variação introduzida nos parâmetros da mistura é maior. Em relação à viscosidade, com base no funil V, todas as classes apresentam classe de consistência VF1, com exceção da Factorial F4 que apresenta classe de consistência VF2 e as composições Factorial F3 e Central Composite CC4 que não apresentam classe.
- Em relação à capacidade de passagem utilizando a caixa L, todas as misturas apresentam classe PL2 com exceção das composições Factorial (F3 e F4) e da Central Composite CC4.

Deste modo, verificou-se que todas as composições de betões com exceção das composições Factorial (F3 e F4) e da Central Composite (CC4) apresentaram características de auto-compactabilidade definidas na norma portuguesa EN 206-9 [37],

classificadas em função do comportamento apresentado na realização dos ensaios no estado fresco.

Os resultados da Tabela 4-4 são representados graficamente em conjunto com os parâmetros da composição (em valores codificados  $V_g/V_{g,lim}$  e  $V_s/V_m$ ) que são apresentados na Figura 4-13 semelhante ao apresentado na Figura 4-13.



**Figura 4-13 - Representação dos resultados no estado fresco e parâmetros da composição**

A Tabela 4-9 apresenta a variação percentual dos resultados no estado fresco apresentados na Figura 4-13 em relação a média da composição Central.

**Tabela 4-9 - Variação dos resultados no estado fresco de cada composição em relação a média da Central**

	C(média)	CC1	CC2	CC3	CC4	F1	F2	F3	F4
<b>D (mm)</b>	714,16	8%	-1%	9%	-30%	4%	6%	-15%	-22%
<b><math>t_{500}</math> (s)</b>	2,92	-47%	-17%	-30%	258%	7%	-39%	121%	159%
<b><math>t_r</math> (s)</b>	6,77	-13%	30%	-12%	1443%	12%	-19%	303%	167%

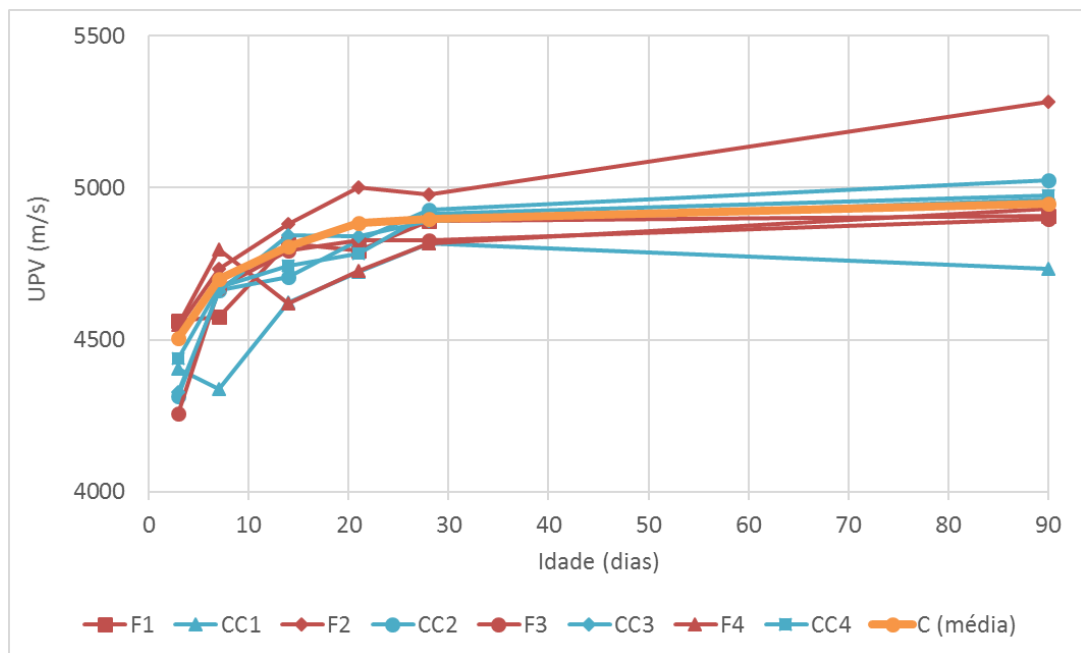
Da análise da Figura 4-13 e da Tabela 4-9, para cada um dos resultados tendo em conta os parâmetros da composição, o seguinte:

- Os valores do diâmetro de espalhamento diminuem tanto com o aumento da razão  $V_g/V_{g,lim}$  (CC1, Ci e CC2) como com o aumento da razão  $V_s/V_m$  (CC3, Ci e CC4). Em relação aos vértices do quadrado, como esperado, o vértice F4 do quadrante superior direito apresentam o menor espalhamento e o maior no vértice F2, porque F4 é a composição que apresenta em simultâneo o maior proporção de  $V_g/V_{g,lim}$  e  $V_s/V_m$  em relação as rentas composições .
- O tempo do diâmetro 500 mm, apresenta uma correlação em relação ao espalhamento para a maior parte das composições, ou seja, quanto maior for o espalhamento menor será este tempo.
- O tempo de funil aumenta ao longo dos eixos  $V_g/V_{g,lim}$  (CC1, Ci e CC2) e do eixo  $V_s/V_m$  (CC3, Ci e CC4).

Face ao exposto acima constata-se que o parâmetro da composição  $V_s/V_m$ , que representa a razão volumetrica entre a areia e argamassa tem grande influência sobre as propriedades dos betões no estado fresco porque apresenta os maiores valores em variação percentual segundo a Tabela 4-9. Quanto aos vértices destacam-se as variações na zona superior F2 e F3.

#### 4.5.2 Ensaios no estado endurecido

A Figura 4-14, apresenta os resultados obtidos da velocidade de propagação de ultrassons, UPV (m/s), (secção 4.4.4.1) para todas as composições, sendo que a composição Central é representada por uma média. Os resultados de algumas composições nas primeiras idades (3,7 e 14 dias) apresentam valores anormais que poderão estar associados a erros experimentais.

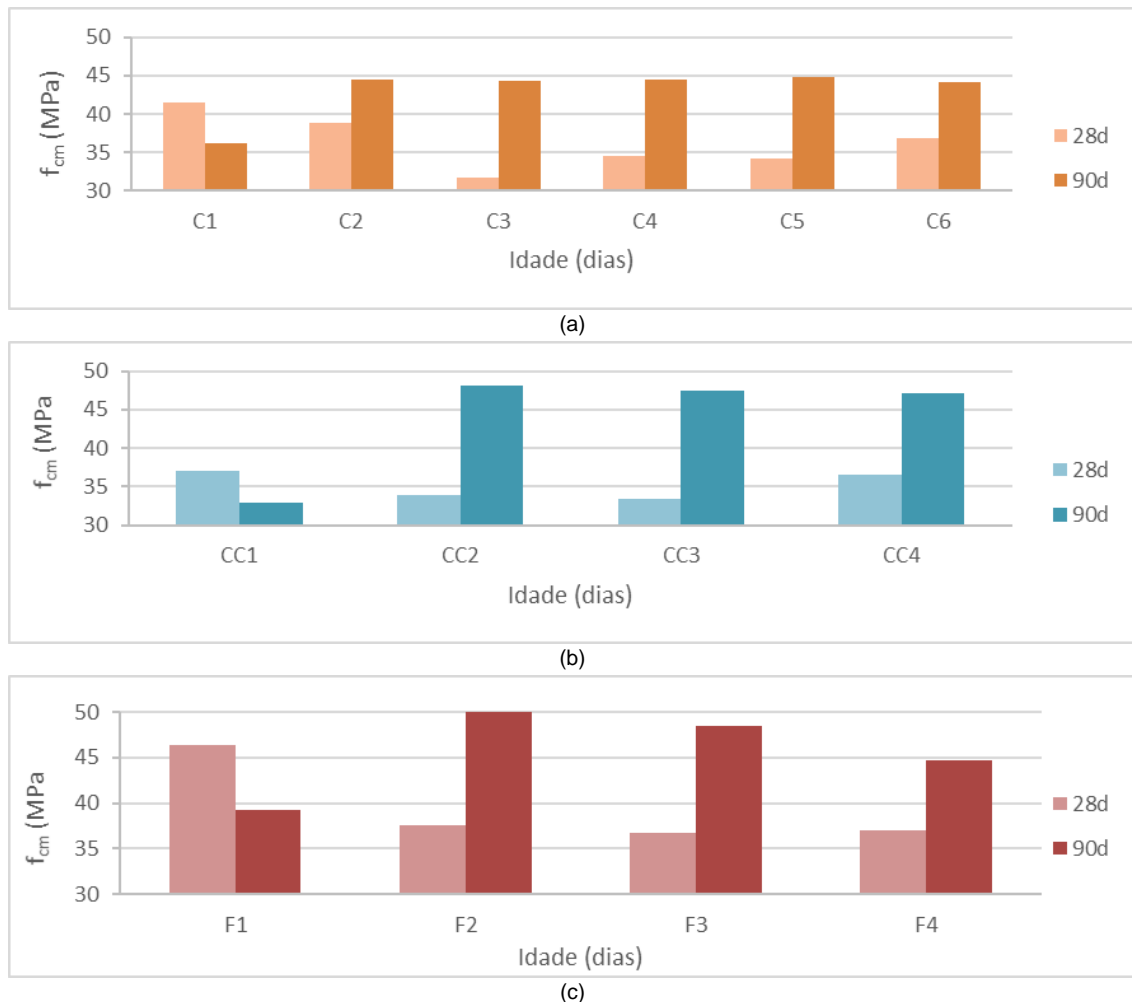


**Figura 4-14 - Velocidade de propagação de ultrassons do conjunto de betões**

Na análise da Figura 4-14, o valor da velocidade de propagação de ultrassons, UPV (m/s), para todas as composições de betões é igual ou superior a 4257 m/s e inferior a 5051 m/s. Para cada um dos conjuntos verifica-se o seguinte:

- Central: o valor médio de todas as composições é de 4790 m/s. Figura 4-14 (a)
- Factorial: o menor valor é de 4257 m/s (F3) e o maior é de 5282 m/s(F2). Figura 4-14 (b)
- Axial: o menor valor é de 4316 m/s (CC2) e o maior é de 5024 m/s (CC2). Figura 4-14 (c)

A Figura 4-15, apresenta os resultados obtidos da resistência à compressão,  $f_{cm}$  (MPa), (secção 4.4.4.2) referente a cada um dos conjuntos de betões, ao longo do tempo. Devido a uma avaria na prensa os resultados das composições Central (C1), Central Composite (CC1) e Factorial (F1) não apresentaram aos 90 dias o resultado esperado, ou seja, os resultados foram inferiores aos obtidos aos 28 dias o que não é expectável.



**Figura 4-15 – Resistência à compressão do conjunto de betões: (a) C, (b) CC e (c) F**

Na análise da Figura 4-15, o valor médio de  $f_{cm}$  (MPa) para a maior parte das composições aos 90 dias de idade é superior ao dos 28 dias de idade apresentando deste modo, um declive positivo. Para cada um dos conjuntos verifica-se o seguinte:

- Central: o valor médio de todas as composições é de 40 MPa. Figura 4-15 (a)
- Factorial: o menor valor é de 37 MPa (F3) e o maior é de 52 MPa (F2). Figura 4-15 (b)
- Axial: o menor valor é de 33 MPa (CC3) e o maior é de 48 MPa (CC2). Figura 4-15 (c)

#### 4.5.2.1 *Resumo geral dos resultados no estado endurecido*

Os resultados dos ensaios de betão obtidos no estado endurecido considerados mais relevantes que são aos 28 e 90 dias são apresentados na Tabela 4-10. Os resultados são apresentados através de valores médios ( $\mu$ ), desvio padrão populacional ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação ( $C_{var}$ ).

**Tabela 4-10 – Resultados dos ensaios de betões no estado endurecido aos 28 e 90 dias**

Composições	Parâmetros da composição		UPV,28d (m/s)			UPV,90d (m/s)		
	Vg/Vg,lim	Vs/Vm	$\mu$	$\sigma$	$C_{var}$	$\mu$	$\sigma$	$C_{var}$
<b>C (média)</b>	0,575	0,500	4896,53	41,89	0,85%	4947,99	36,94	0,74%
<b>CC1</b>	0,526	0,500	4818,00	7,29	0,15%	4731,89	12,19	0,95%
<b>CC2</b>	0,624	0,500	4929,03	33,23	0,41%	5024,08	94,48	0,31%
<b>CC3</b>	0,575	0,451	4891,39	19,92	0,15%	4961,46	15,51	0,53%
<b>CC4</b>	0,575	0,549	4912,89	33,01	0,61%	4973,27	67,00	0,86%
<b>F1</b>	0,540	0,465	4891,66	42,09	1,37%	4908,17	65,25	1,01%
<b>F2</b>	0,610	0,465	4977,89	7,78	0,15%	5281,86	30,37	0,95%
<b>F3</b>	0,540	0,535	4828,34	7,33	0,41%	4896,64	7,53	0,31%
<b>F4</b>	0,610	0,535	4818,03	14,62	0,15%	4930,29	85,98	0,53%

Composições	Parâmetros da composição		$f_{cm,28d}$ (MPa)			$f_{cm,90d}$ (MPa)		
	Vg/Vg,lim	Vs/Vm	$\mu$	$\sigma$	$C_{var}$	$\mu$	$\sigma$	$C_{var}$
<b>C (média)</b>	0,575	0,500	36,28	2,49	6,84%	43,06	3,18	7,39%
<b>CC1</b>	0,526	0,500	36,97	1,00	2,72%	32,85	0,75	2,28%
<b>CC2</b>	0,624	0,500	33,90	1,57	4,63%	48,16	1,24	2,58%
<b>CC3</b>	0,575	0,451	33,42	2,77	8,29%	47,48	1,48	3,12%
<b>CC4</b>	0,575	0,549	36,53	1,82	4,99%	47,15	0,96	2,04%
<b>F1</b>	0,540	0,465	46,38	1,44	3,11%	39,20	0,78	2,00%
<b>F2</b>	0,610	0,465	37,61	0,59	1,57%	52,27	2,34	4,48%
<b>F3</b>	0,540	0,535	36,79	2,27	6,17%	48,56	0,52	1,07%
<b>F4</b>	0,610	0,535	37,04	1,38	3,73%	44,77	4,78	10,69%

Nesta fase, tendo em conta a Tabela 4-10, é importante realçar que todos os valores obtidos em cada um dos ensaios no estado endurecido encontram-se dentro dos valores apresentados em trabalhos desta natureza [8], [57], nomeadamente:

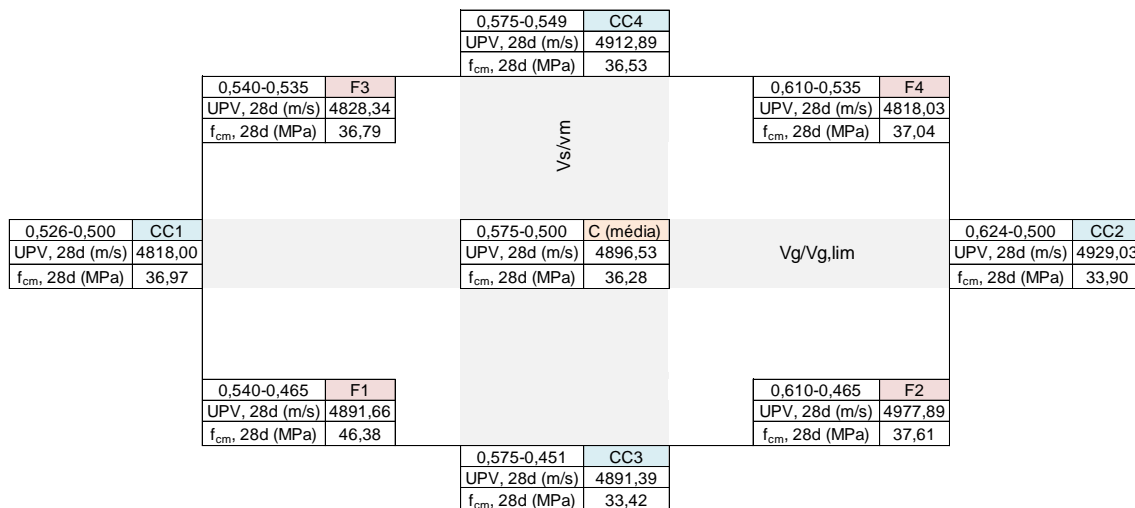
- O coeficiente de variação dos valores da velocidade de propagação de ultrassons, UPV (m/s), é igual a 1%, para as duas idades. E o valor médio de UPV, para todas as composições de betões é sempre superior a 4800 m/s, sendo este um bom indicador para betões de acordo com a classificação reproduzida na Tabela 4-11.

**Tabela 4-11 - Classificação do betão em função da velocidade de propagação de ultrassons [57]**

UPV (m/s),	Qualidade do betão
> 4500	Excelente
3500 – 4500	Bom
3000 - 3500	Comportamento duvidoso
3500 – 2000	Pobre
< 2000	Muito pobre

- A resistência à compressão,  $f_{cm}$  (MPa), verificou-se para as duas idades que o valor do coeficiente de variação é inferior a 11%, o que representa uma dispersão de resultados aceitável. É notável o aumento de resistência mecânica, de quase 16%, dos 28 dias em relação aos 90 dias do conjunto da composição Central, sendo que no geral as restantes composições (exceção F1 e CC1) obtiveram um aumento superior.

Na análise dos parâmetros da composição apresentados em conjunto com os resultados obtidos na tabela 4-5, estes são representados nas Figura 4-16 e Figura 4-17 (em valores codificados  $V_g/V_{g,lim}$  e  $V_s/V_m$ ), conforme a representação efetuada dos mesmos na Figura 4-1, onde através do quadrado da CCD é possível analisar os resultados no estado endurecido.



**Figura 4-16 - Representação dos resultados no estado endurecido aos 28 dias e parâmetros da composição**

A Tabela 4-12 apresenta a variação percentual dos resultados no estado endurecido aos 28 dias apresentados na Figura 4-16 em relação a média da composição Central.

**Tabela 4-12 - Variação dos resultados no estado endurecido aos 28 dias de cada composição em relação a média da Central**

	C(média)	CC1	CC2	CC3	CC4	F1	F2	F3	F4
<b>UPV,28d (m/s)</b>	4896,53	-1,6%	0,7%	-0,1%	0,3%	-0,1%	1,7%	-1,4%	-1,6%
<b>f<sub>cm</sub>, 28d (MPa)</b>	36,28	1,9%	-6,5%	-7,9%	0,7%	27,9%	3,7%	1,4%	2,1%

Da análise da Figura 4-16 e da Tabela 4-12, para cada um dos resultados tendo em conta os parâmetros da composição, verifica-se para cada um dos ensaios do estado endurecido aos 28 dias, o seguinte:

- A velocidade de propagação de ultrassons UPV, aumenta ao longo do eixo de Vg/Vg,lim (CC1, Ci, CC2), de forma significativa. Quanto ao eixo Vs/Vm (CC3, Ci e CC4) o valor de UPV varia pouco. Em relação aos vértices do quadrado, a velocidade é máxima na zona do quadrante inferior direito em F2.
- A resistência à compressão, f<sub>cm</sub>, diminui ao longo do eixo Vg/Vg,lim (CC1, Ci, CC2) e aumenta ao longo do eixo Vs/Vm (CC3, Ci e CC4). Em relação aos vértices da caixa, a resistência à compressão é máxima no vértice F1.

O efeito do parâmetro da composição Vs/Vm é mínimo e existe uma forte influência do parâmetro Vg/Vg,lim, nos resultados apresentados, onde destaca-se a zona inferior da caixa da CCD no estado endurecido aos 28 dias. Dentre os quais o comportamento da composição F2 que registou a maior variação percentual positiva em relação ao ponto central.

**Figura 4-17 - Representação dos resultados no estado endurecido aos 90 dias e parâmetros da composição**

A Tabela 4-13 apresenta a variação percentual dos resultados no estado endurecido aos 28 dias apresentados na Figura 4-16 em relação a média da composição Central.

**Tabela 4-13 - Variação dos resultados no estado endurecido aos 90 dias de cada composição em relação a média da Central**

	C(média)	CC1	CC2	CC3	CC4	F1	F2	F3	F4
<b>UPV, 90d (m/s)</b>	4947,99	-4,4%	1,5%	0,3%	0,5%	-0,8%	6,7%	-1,0%	-0,4%
<b>f<sub>cm</sub>, 90d (MPa)</b>	43,06	-23,7%	11,8%	10,3%	9,5%	-9,0%	21,4%	12,8%	4,0%

Da análise da Figura 4-17 e da Tabela 4-13, para cada um dos resultados tendo em conta os parâmetros da composição, verifica-se para cada um dos ensaios do estado endurecido aos 90 dias, o seguinte:

- A velocidade de propagação de ultrassons, UPV, aumenta ao longo do eixo de  $V_g/V_{g,lim}$  (CC1, Ci, CC2), de forma significativa. O valor ao longo do eixo  $V_s/V_m$  (CC3, Ci, CC4) é muito semelhante. Em relação aos vértices do cubo, a velocidade aumenta na zona do quadrante inferior direito, no vértice F2. A velocidade apresentou aos 90 dias uma maior variação percentual que aos 28 dias.
- A resistência à compressão,  $f_{cm}$ , aumenta significativamente ao longo do eixo de  $V_g/V_{g,lim}$  (CC1, Ci, CC2), sendo que no eixo  $V_s/V_m$  (CC3, Ci, CC4) identifica-se um mínimo. Em relação aos vértices do cubo destaca-se o vértice F2 que é o valor máximo alcançado de resistência mecânica.

Tal como esperado o quadrante inferior direito, nomeadamente o vértice F2, apresentou os melhores resultados aos 90 dias bem como o melhor comportamento em relação aos 28 dias. Verifica-se que existe uma correlação entre a velocidade de propagação de ultrassons e a resistência à compressão. O parâmetro  $V_g/V_{g,lim}$  exerce uma forte influência sobre estas propriedades, onde destaca-se o comportamento apresentado pelo vértice F2.

#### 4.5.3 Ajuste de modelos numéricos e otimização das misturas

Após a análise dos dados recolhidos para cada uma das variáveis de resposta é possível procurar o modelo quadrático com o melhor ajuste a cada variável de resposta, através de uma análise de regressão multilinear e análise de variância (ANOVA). Em seguida, será necessário proceder à validação dos modelos numéricos obtidos através da análise dos resíduos procurando tendências, evidências de auto-correlação ou “outliers”; e interpretar graficamente os modelos [56].

Finalmente, após a construção dos modelos de regressão podem utilizar-se técnicas de otimização numérica para determinar a gama de parâmetros da composição onde a deformabilidade e a viscosidade coexistem de uma forma equilibrada, para assegurar a auto-compactabilidade, enquanto são satisfeitos os restantes requisitos de desempenho [56].

Estas tarefas estão fora do âmbito do presente TFM, mas serão desenvolvidas em trabalhos futuros.

## **5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

### **5.1 Considerações iniciais**

No presente capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido ao longo da campanha experimental deste TFM, efetua-se uma síntese dos aspetos mais relevantes.

Tal como descrito e referenciado ao longo da dissertação, este trabalho é fruto de um extenso trabalho de investigação que tem por objetivo avaliar o efeito da incorporação de FCC em materiais à base de cimento com participação de diversas instituições e liderado pelo ISEL, sendo que neste utilizou-se pela primeira vez no estudo ao nível do betão um plano fatorial no planeamento das experiências.

Os resultados obtidos e a respetiva análise neste TFM serviram para reafirmar e suportar o uso de resíduo de FCC como substituto parcial do cimento na preparação de betão auto-compactável.

Apresenta-se na parte final deste capítulo, uma proposta com sugestões para a continuação da mesma linha de investigação para trabalhos futuros, tendo em conta a experiência obtida neste TFM.

## 5.2 Conclusões

Este trabalho teve como um dos principais objetivos produzir betão auto compactável com incorporação de resíduo de FCC (adição do tipo II - pozolânica). A campanha experimental envolveu diferentes etapas, desde a caracterização de agregados, definição do plano experimental com base num plano fatorial, preparação e ensaio de argamassas e betões. Na preparação de cada uma das fases, minimizou-se sempre o erro (experimental, humano) de modo a obter os melhores resultados, para posterior análise.

As conclusões gerais observadas são as seguintes:

- O plano fatorial de experiências permite a possibilidade de avaliar estatisticamente, os efeitos dos parâmetros da composição nas propriedades utilizando para o efeito um número mínimo de composições. A sua aplicação na otimização de composições de BAC permite alcançar conclusões de forma eficaz e eficiente. Estas conclusões são importantes porque têm por base o efeito dos parâmetros da composição (tal como no método de Okamura *et al* [21]) nas diferentes propriedades
- A avaliação das propriedades a curto prazo através dos ensaios no estado fresco visou sempre a garantia da auto-compactabilidade e ao longo do tempo no estado endurecido visou sempre a garantia de um conjunto de propriedades ligadas à durabilidade preservando sempre a resistência mecânica.
- A substituição parcial do cimento pelo resíduo de FCC, wFCC/finos neste TFM foi fixada em 21,30%, e a razão água-cimento, w/c definida foi de 0,45.
- Os valores dos resultados obtidos nos ensaios no estado fresco e endurecido de uma forma generalizada estiveram dentro dos limites estabelecidos pelas normas europeias utilizadas para a avaliação das propriedades e qualitativamente semelhantes aos obtidos nos trabalhos desta natureza desenvolvidos anteriormente no ISEL [7]–[9], [15], [20], [46].

Em particular, para as argamassas verificaram-se as seguintes conclusões:

- Os parâmetros e a formulação das composições das argamassas foram efetuados no âmbito do trabalho anterior [20], que consistiu na preparação de argamassas auto-compactáveis com incorporação de resíduo de FCC utilizando o plano fatorial de ensaios. A otimização teve como objetivo maximizar os valores das propriedades, garantir a eco-sustentabilidade da pasta através da maior incorporação de resíduo possível e garantir a auto-compactabilidade.

- Os parâmetros da composição das argamassas foram os seguintes:  $V_w/V_p = 0,88$ ;  $w/c = 0,45$ ;  $S_p/p = 1,90\%$  para a argamassa otimizada e  $V_w/V_p = 0,95$ ;  $w/c = 0,49$ ;  $S_p/p = 1,95\%$  para a argamassa central.
- Foram preparadas duas composições distintas, argamassa central e a argamassa otimizada, no qual repetiu-se a otimizada com o procedimento de mistura modificado e comprovou-se a influência deste nas propriedades.
- A preparação das argamassas otimizadas que serviu para a validação do modelo experimental de definição da composição da pasta do betão, confirmam a robustez do modelo, inclusive com o procedimento de mistura modificado. Alcançando deste modo níveis de reprodutibilidade e repetibilidade aceitáveis.
- A preparação da argamassa central serviu também para aferir a reprodutibilidade não só do operador, mas também dos materiais, equipamentos, etc.
- No geral para as argamassas, constatou-se, como era esperado que os parâmetros  $V_w/V_p$  e  $w/c$  exercem forte influência nas propriedades do estado fresco nomeadamente o espalhamento e a fluidez. E no estado endurecido influenciam a velocidade de propagação de ultrassons e a resistência mecânica. O parâmetro  $S_p/p$  exerce muito pouca ou nenhuma influência e, portanto, é negligenciável para a gama de dosagens estudadas ( $V_w/V_p$  e  $w/c$ ).
- Com estes resultados foi possível efetuar a definição da composição da pasta para o estudo ao nível do betão tendo em conta a região experimental dos parâmetros da composição dos betões.

Em particular para os betões verificaram-se as seguintes conclusões:

- A composição de betão foi otimizada utilizando o plano fatorial de experiências na qual foi definida a região experimental definida no estudo das argamassas (otimizadas) onde os parâmetros  $V_w/V_p$ ,  $w/c$  e  $S_p/p$  foram fixados e estabeleceu-se a gama de valores para cada um dos parâmetros de composição dos betões em estudo que são os seguintes:  $V_g/V_{g,lim} = 0,526-0,624$  e  $V_s/V_m = 0,451-0,549$
- No estado fresco o parâmetro  $V_s/V_m$  exerce forte influência sobre as propriedades. As composições foram classificadas segundo as classes de consistência definidas na norma portuguesa NP EN 206-9 [37]. Sendo que em relação à aplicação da composição Central esta pode ser utilizada em estruturas correntes e apresenta boa capacidade de preenchimento e auto-nivelamento e melhor grau de acabamento [17].
- No estado endurecido, o parâmetro  $V_g/V_{g,lim}$  exerce influência sobre as propriedades quer aos 28 dias ou aos 90 dias e é comprovado o aumento da resistência à compressão ao longo do tempo. Os valores obtidos nos ensaios de

velocidade de propagação de ultrassons revelaram-se bons indicadores em relação à durabilidade do betão. Comprovou-se a correlação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ultrassons

- A influência dos dois parâmetros em simultâneo em cada uma das propriedades do estado fresco e endurecido não se verificou. É necessário um estudo extensivo sobre a influência individual de cada parâmetro nas restantes propriedades do betão, apesar dos valores previstos pelo modelo que foi construído na preparação das argamassas indicarem que estes parâmetros eram os que proporcionavam um melhor desempenho das propriedades, apesar da fixação do parâmetro w/c, sendo que é notório a influência do parâmetro w/c nas propriedades a longo prazo
- Este estudo é um contributo para a reafirmação e suporte do uso de resíduo de FCC como substituto parcial do cimento, uma vez que conduz a um melhor desempenho em materiais à base de cimento como foi comprovado por este trabalho e pelos anteriores. E além disso permitir a diminuição da exploração de recursos naturais associados a produção de cimento e redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

### 5.3 Proposta para trabalhos futuros

O desenvolvimento de materiais à base de cimento com incorporação de resíduos industriais é uma das vias para atingir o desenvolvimento sustentável na produção de betão com materiais provenientes das indústrias da construção e petrolífera. A utilização de métodos estatísticos na otimização da composição destes materiais permite a execução de diferentes estudos com maior precisão na análise de resultados. Portanto o estudo efetuado neste TFM pode ser ainda mais desenvolvido através dos seguintes trabalhos:

- Avaliação das restantes propriedades no estado fresco de BAC com os mesmos parâmetros de composição, no estado fresco utilizando os ensaios de segregação no peneiro, espalhamento no anel J, etc. No estado endurecido utilizando os ensaios de análise dimensional, tração por compressão diametral, absorção de água por capilaridade/imersão, resistividade elétrica, resistência à penetração de cloretos, carbonatação, etc.
- Ajuste do modelo experimental utilizado neste TFM e otimização das composições do BAC com alteração ou substituição de um parâmetro da composição.
- Alteração das condições de cura, nomeadamente, de temperatura e humidade.
- Modelação e simulação numérica do fluxo do BAC durante a execução de ensaios no estado fresco.
- Avaliação das propriedades mecânicas com idades mais curtas (7, 14, 21 e 28 dias) de modo a tirar mais conclusões sobre a evolução do seu comportamento.
- Estudo do comportamento de BAC ao longo do tempo em elementos estruturais de betão armado nomeadamente da aderência entre o aço-betão.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] EUROPEU, Parlamento - Regulamento (UE) N° 305/2011, JOUE L 88. **Jornal Oficial da União Europeia**. 2011:2011) 5–43.
- [2] COUTINHO, Joana De Sousa - Ligantes e caldas. Em PORTO, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO (Ed.) - **Materiais de Construção 2** [Em linha]. Porto : [s.n.] [Consult. 14 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ligantes2006.pdf>. p. 160.
- [3] OLIVEIRA, MIGUEL;ALMEIDA, Elson - **Betão Auto-Compactável**. [Em linha]. Faro : [s.n.] [Consult. 14 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://w3.ualg.pt/~mjolivei/Betão Auto-Compactável.pdf>.
- [4] INSTITUTO CAMÕES - **Agenda 2030 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - Camões - Instituto da Cooperação e da Língua**. [Em linha], atual. 2016. [Consult. 14 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://www.instituto-camoes.pt/activity/o-que-fazemos/cooperacao/cooperacao-portuguesa/mandato/ajuda-ao-desenvolvimento/agenda-2030>.
- [5] IPQ - **NP EN 206-1- Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade**. Portugal :2007
- [6] SANTOS, João; GOMES, Augusto; VINAGRE, João - O betão autocompactável e o seu desempenho. Estado da arte em termos de investigação. **Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012**. 2012) 10.
- [7] LAGINHA, INÊS; COSTA, CARLA; NUNES, Sandra - Betão auto-compactável produzido com incorporação de calcário moído e de resíduo da refinação de petróleo. **IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-Compactável BAC2015**. 2015) 12.
- [8] ANTÓNIO, José Luís Dos Santos - **Estudo de viabilidade da produção de Betões Auto compactáveis com incorporação de Catalisador exausto da Indústria Petroquímica. Dissertação de Mestrado**. Lisboa : Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013
- [9] PAIVA, Miguel Sobral - **ECO – Argamassas de Cal Hidráulica para Reabilitação de Edifícios. Dissertação de Mestrado**. [S.l.] : Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2016
- [10 ] UNITED-NATIONS - Report: The World at Six Billion 1. 2000.
- [11] JAHREN, PER; SUI, Tongbo - **Concrete and Sustainability**. Florida : Press, CRC Press; Chemical Industry, 2013
- [12] KUNSTELER, James Howard - **The Long Emergency: Surviving the End of Oil, Climate Change, and Other Converging Catastrophes of the Twenty-First Century**. New York : Press, Atlantic Monthly, 2005
- [13] COSTA, Carla - Ligantes hidráulicos. Em GONÇALVES, M. CLARA ;MARGARIDO,

FERNANDA (Ed.) - **Ciência e engenharia de materiais de construção**. [S.l.] : IST Press, 2012. p. 68.

[14] ARQUITETURA-PORTUGUESA - **Construção Sustentável** [Em linha], atual. 2012. Disponível em WWW:<URL:http://www.arquiteturaportuguesa.pt/construcao-sustentavel/>.

[15] COSTA, Carla; RIBEIRO, M.Sofia; BRITO, Nuno - Effect of Waste Oil-Cracking Catalyst Incorporation on Durability of Mortars. **Materials Sciences and Applications**. . ISSN 2153-117X. 5:13 (2014) 905–914. doi: 10.4236/msa.2014.513092.

[16] PINTO, Célia - **Betão «mais verde»** [Em linha], atual. 2015. [Consult. 14 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://www.poci-competete2020.pt/noticias/detalhe/9719\_Betao>.

[17] SILVA, Pedro; BRITO, Jorge DE - Betão auto-compactável (BAC) -estado actual do conhecimento. 2009.

[18] TUTIKIAN, Bernardo Fonseca - **Método de dosagem de concretos auto-adensável. Dissertação de Mestrado**. Rio Grande do Sul : Univeside Federal do Rio Grande do Sul, 2004

[19] G. DE, SCHUTTER; P. J. M., BARTOS; P, DOMONE; J, Gibbs - **Self-Compacting Concrete**. Scotland : Publishing, Whittles, 2008

[20] NUNES, SANDRA; COSTA, Carla - Tailor-Made SCC Incorporating Spent Equilibrium Catalyst from Oil Refinery. **Self-Compacting Concrete and 6th North American Conference on Design and Use of Self-Consolidating Concrete**. 2016.

[21] OKAMURA, Hajime - **Prof. Okamura Articles** [Em linha], atual. 1982. [Consult. 14 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/history/prof-okamura/>.

[22] VIETNAM, Holcim - **Concrete - Historical timeline** [Em linha], atual. 2015. [Consult. 1 jan. 2016]. Disponível em WWW:<URL:https://pt.slideshare.net/hanndnguyen/concrete-historical-timeline>.

[23] ZAKKA, Ziad Ahmad; CARRASQUILLO, Ramon L. - **EFFECTS OF HIGH-RANGE WATER REDUCERS ON THE PROPERTIES OF FRESH AND HARDENED CONCRETE** [Em linha]. Texas : [s.n.] [Consult. 21 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://library.ctr.utexas.edu/digitized/texasarchive/phase2/1117-3F.pdf>.

[24] NUNES, Sandra - **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedade. Dissertação de Mestrado**. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001

[25] LAGINHA, Inês - **Reutilização de catalisador exausto da indústria petroquímica em betões autocompactáveis. Relatório de estágio OE**. Lisboa : 2013.]

[26] SILVA, Pedro Miguel Soares Raposeiro - **Métodos de estudo da composição de betão auto-compactável(BAC) verificação da sua aplicação técnico-económica. Dissertação de Mestrado**. [S.l.] : Instituto Superior Técnico, 2007

[27] FERREIRA, Rui Manuel Dos Santos - **Betão auto-compactável metodologia e composição. Dissertação de Mestrado**. [S.l.] : Universidade do Minho, 2001

- [28] SKARENDAHL, A; PETERSSON, Ö. - State-of-the-art report of rilem technical committee 174-SCC, self-compacting concrete. Em **RILEM Publication**. ISBN 2912143233. p. 17–22.
- [29] EFNARC - The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. **The European Guidelines for Self Compacting Concrete**. May (2005) 63.
- [30] IBERO-AMERICANO, Congresso - **Congresso Ibero-americano sobre betão auto-compactável e betões especiais** [Em linha], atual. 2008. [Consult. 1 jan. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://hac-bac.webs.upv.es/hacbac-congresso-ibero-americano-sobre-betão-auto-compactável.html>.
- [31] SCHUTTER, G. DE; K, Audenaert - State-of-the-art report of rilem technical committee 205-DSC. Em **RILEM Publication**. 2007
- [32] IPQ - **NP EN 12350-8- Ensaios do betão fresco. Parte 8: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento**. Portugal : 2010
- [33] IPQ - **NP EN 12350-9- Ensaios do betão fresco. Parte 9: Betão autocompactável. Ensaio de escoamento no funil V**. Portugal : 2010
- [34] IPQ - **NP EN 12350-10- Ensaios do betão fresco. Parte 10: Betão autocompactável. Ensaio de escoamento na caixa L**. Portugal : 2010
- [35] ICF BUILDER MAGAZINE - **Self Consolidating Concrete** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 14 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://www.icfmag.com/articles/features/Self\_Consolidating\_Concrete.html>.
- [36] NEPOMUCENO, Miguel Costa Santos - **Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis. Tese de Doutoramento**. [S.l.] : Universidade Beira Interior, 2005
- [37] IPQ - **NP EN 206-9: Regras adicionais para betão auto-compactável (BAC)**. Portugal : 2010
- [38] IPQ - **NP EN 197-1 - Cimento - Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes**. Portugal : 2001
- [39] CIMPOR - **Ficha técnica - Cimento Portland de Calcário CEM II/A-L 42,5 R** [Em linha], atual. 2014. [Consult. 14 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://www.cimpor-portugal.pt/cache/binImagens/03\_Ficha\_Tecnica\_CEM\_II\_A-L\_42,5R\_AF\_MAIO-142-1540.pdf>.
- [40] SECIL - Ficha técnica Cimento Portland de Calcário CEM II/A-L 42,5R. 2016.
- [41] SILVA, Pedro Raposeiro Da - **Materiais Constituintes do BAC**. Em **Tecnologia dos materiais de construção II**. Lisboa : Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013
- [42] SONEBI, Mohammed - Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. **Cement and Concrete Research**. . ISSN 00088846. 34:7 (2004) 1199–1208. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.022.

- [43] BOUKENDAKDJI, Othmane; KADRI, El-Hadj; KENAI, Said - Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**. . ISSN 09589465. 34:4 (2012) 583–590. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.08.013.
- [44] FATHI, Hamoon *et al.* - Simultaneous effects of fiber and glass on the mechanical properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 133:2017) 443–449. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.097.
- [45] PAYÁ, J. *et al.* - Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland. **Materiales de Construcción**. . ISSN 1988-3226. 59:296 (2009) 37–52. doi: 10.3989/mc.2009.48108.
- [46] SILVA, Francisco Gabriel Santos - **Estudo do uso de resíduo catalítico do refino de petróleo na construção civil. Tese de Doutorado**. [S.l.] : Universidade Federal da Bahia, 2015
- [47] CECCON, GUILHERME FERREIRA; CAMARINI, Gladis - Viabilidade técnica do uso do «catalisador gasto do craqueamento catalítico». **GEDRRIC - LARES - UNICAMP - São Paulo**. 2010).
- [48] GALLY, Caline Rodrigues - **Potencialidade do uso de resíduo catalítico gerado em refinaria de petróleo para produção de materiais cimentícios de baixo impacto ambiental. Dissertação de mestrado**. [S.l.] : Universidade Federal da Bahia, 2002
- [49] CONCEIÇÃO, Maria Inês De Almeida Laginha - **Reutilização de Catalisador exausto da Indústria Petroquímica em materiais à base de Cimento. Dissertação de Mestrado**. [S.l.] : Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011
- [50] UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. FACULTAD DE INGENIERÍA., Nancy Torres; CASTELLANOS, Nancy Torres; AGREDO, Janneth Torres - Ingeniería e investigación. **Ingeniería e Investigación**. 30:2 (2010) 35–42.
- [51] CHEN, Hsiu-Liang; TSENG, Yun-Sheng; HSU, Kung-Chung - Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars. **Cement and Concrete Composites**. . ISSN 09589465. 26:6 (2004) 657–664. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00048-9.
- [52] IPQ - **NP EN 12620 - Agregados para betão**. Portugal : 2004
- [53] EFNARC - Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. **Report from EFNARC**. 44:February (2002) 32. doi: 0 9539733 4 4.
- [54] IPQ - **“NP EN 1008 - Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão**. Portugal : 2003
- [55] LOUKILI, Ahmed. - **Self-compacting concrete**. [S.l.] : ISTE, 2011. ISBN 1848212909.
- [56] NUNES, Sandra Da Conceição Barbosa - **Performance-based design of self-compacting**

**concrete (SCC): a contribution to enhance SCC mixtures robustness. Dissertação de Doutoramento.** [S.l.] : Universidade do Porto, 2008

[57] SILVA, Pedro Miguel Soares Raposeiro - **Avaliação da durabilidade de betões autocompactáveis(BAC). Tese de Doutoramento.** [S.l.] : Instituto Superior Técnico, 2013

[58] JSCE, Concrete Engineering Series 31 - **Recommendation for Self-Compacting Concrete** [Em linha]. Tokyo : Japan Society of Civil Engineers, 1999 [Consult. 15 mai. 2017]. Disponível em  
WWW:<URL:http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter01/recommendation/selfcompact/1.pdf>.

[59] SU, Nan; HSU, Kung-Chung; CHAI, His-Wen - A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research.** . ISSN 00088846. 31:12 (2001) 1799–1807. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00566-X.

[60] TUTIKIAN, Bernardo Fonseca - **Proposição de um método de dosagem experimental para concreto auto-adensáveis. Tese de Doutoramento.** [S.l.] : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007

[61] ACI COMMITTEE 237.; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. - **Self-Consolidating concrete** [Em linha]. [S.l.] : American Concrete Institute, 2007 [Consult. 15 mai. 2017]. Disponível em  
WWW:<URL:https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=23707&Format=DOWNLOAD>. ISBN 9780870312441.

[62] NICE, Norden-Nordic Innovation Centre - **Nordic SCCNet - Nordic network for RTD on self compacting concrete - Nordic Innovation** [Em linha], atual. 2006. [Consult. 15 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://nordicinnovation.org/sv/publikationer/nordic-sccnet-nordic-network-for-rtd-on-self-compacting-concrete/>.

[63] IPQ - **NP EN 196-1-Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.** Portugal : 2006

[64] IPQ - **NP EN 12390-1 - Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes.** Portugal : 2003

[65] IPQ - **NP EN 12390-2 - Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.** Portugal : 2003

[66] IPQ - **NP EN 12504-4- Ensaio do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons.** Portugal : 2007

[67] ABNT - **NBR 15630 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.** Brasil : 2008

[68] LUPING, TANG; EU - PROJECT CHLORTEST, G6RD-CT-2002-00855; SWEDISH

NATIONAL, Testing And Research Institute - **Guideline for Practical Use of Methods for Testing the Resistance of Concrete to Chloride Ingress Deliverable D23** [Em linha]. Sweden : [s.n.] [Consult. 15 mai. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/Aulas\_Apresentacoes/07\_Bibliografia/durabilidade betao %28durability%29/Outros/Guidline different method choloride ingress.pdf>.

[69] POLDER, R. - Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**. 33:2000) 603–611.

[70] CEN - **EN 1015-11 - Methods of test mortar for masonry -Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar**. Brussels : 1999

[71] LNEC - **Especificação LNEC E-466 - Fíleres calcários para ligantes hidráulicos**. Portugal : 2005

[72] ISO - **ISO 679 - Cement - Test methods - Determination of strength**. Switzerland : 2009

[73] ASTM - **ASTM C597-16 - Standar Test Method for Pulse Velocity Trough Concrete**. United States of America : 2016

[74] SILVA, P. C.; FERREIRA, R. M.; FIGUEIRAS, H. - Medições de resistividade elétrica avaliada em provetes de betão: influência do método de ensaio e das condições de cura. **Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012**. 2012.

[75] IPAC - **L0201- Teixeira Duarte - Laboratório de Materiais**. Portugal : 1996

[76] IPQ - **NP EN 932-1 - Ensaaios das propriedades gerais dos agregados**. Portugal : 2002]

[77] IPQ - **NP EN 933-1- Ensaaios das propriedades geometricas dos agregados**. Portugal : 2000

[78] IPQ - **NP EN 933-2- Ensaaios para determinação das características geometricas**. Portugal : 1999

[79] IPQ - **NP EN 933 - 8 - Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados**. Portugal : 2002

[80] IPQ - **NP EN 1097-3- Ensaaios para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios**. Portugal : 2002

[81] IPQ - **NP EN 1097-6- Ensaaios das propriedades mecanicas e fisicas**. Portugal : 2003

[82] IPQ - **NP EN 12390-3- Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes**. Portugal : 2009

[83] MONTGOMERY, Douglas C. - Design and Analysis of Experiments. **Design**. . ISSN 00401706. 2:653 (2001) 780 ST-Design and analysis of experiments. Adva. doi: 10.1198/tech.2006.s372.

## **ANEXOS**

**Anexo A – Calendário da campanha experimental**

**Anexo B – Fichas técnicas dos materiais**

**Anexo C – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido das argamassas**

**Anexo D – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido dos betões**

## **Anexo A - Calendário da campanha experimental**

A.1 - Amassaduras e ensaios de argamassas

A.2 - Amassaduras e ensaios de betões

## A.1 – Amassaduras e ensaios de argamassas

ISEL-TFM-35205

### CALENDÁRIO - CAMPANHA EXPERIMENTAL - ARGAMASSAS

- AC** Conjunto de amostras do nº 1 ao 6 da argamassa central  
**AO** Conjunto de amostras do nº 1 ao 6 da argamassa otimizada  
**AO\_pmm** Conjunto de amostras do nº 7 ao 12 da argamassa otimizada com procedimento de mistura modificado

		Idade de hidratação (dias)	Data calendário								
			0	1	3	7	14	21	28	56	90
1	AO e AC	Data calendário	02-05-2016	03-05-2016	05-05-2016	09-05-2016	16-05-2016	23-05-2016	30-05-2016	27-06-2016	31-07-2016
2	AO_pmm	Data calendário	10-05-2016	11-05-2016	13-05-2016	17-05-2016	24-05-2016	31-05-2016	07-06-2016	05-07-2016	08-08-2016

Estado fresco	Diametro de espalhamento	NP EN 12350-8	x								
	Tempo de funil	NP EN 12350-9	x								
Moldagem...Desmoldagem		NP EN 196-1...	x	x							
Estado endurecido	Resistividade elétrica	CHLORTEST...			x	x	x	x	x	x	x
	Velocidade ultrassons	NP EN 12504-4...			x	x	x	x	x	x	x
	Resistência mecânica	NP EN 196-1...							x		x

## A.2 – Amassaduras e ensaios de betões

ISEL - TFM - 35205

### CALENDÁRIO - CAMPANHA EXPERIMENTAL - BETÕES

- C** Central – Conjunto constituído por 6 composições idênticas que têm a designação “C1” até a “C6”;  
**F** Factorial – Conjunto constituído por 4 composições diferentes que têm a designação “F1” até a “F4”;  
**CC** Central Composite – Conjunto constituído por 4 composições diferentes que têm a designação “CC1” até a “CC4”.

		Idade de hidratação (dias)	Data calendário							
			0	1	3	7	14	21	28	56
1	C1	15-06-2016	16-06-2016	18-06-2016	22-06-2016	29-06-2016	06-07-2016	13-07-2016	10-08-2016	13-09-2016
2	F1	17-06-2016	18-06-2016	20-06-2016	24-06-2016	01-07-2016	08-07-2016	15-07-2016	12-08-2016	15-09-2016
3	CC1	17-06-2016	18-06-2016	20-06-2016	24-06-2016	01-07-2016	08-07-2016	15-07-2016	12-08-2016	15-09-2016
4	C2	22-06-2016	23-06-2016	25-06-2016	29-06-2016	06-07-2016	13-07-2016	20-07-2016	17-08-2016	20-09-2016
5	F2	23-06-2016	24-06-2016	26-06-2016	30-06-2016	07-07-2016	14-07-2016	21-07-2016	18-08-2016	21-09-2016
6	CC2	24-06-2016	25-06-2016	27-06-2016	01-07-2016	08-07-2016	15-07-2016	22-07-2016	19-08-2016	22-09-2016
7	C3	28-06-2016	29-06-2016	01-07-2016	05-07-2016	12-07-2016	19-07-2016	26-07-2016	23-08-2016	26-09-2016
8	F3	01-07-2016	02-07-2016	04-07-2016	08-07-2016	15-07-2016	22-07-2016	29-07-2016	26-08-2016	29-09-2016
9	C4	01-07-2016	02-07-2016	04-07-2016	08-07-2016	15-07-2016	22-07-2016	29-07-2016	26-08-2016	29-09-2016
10	CC3	01-07-2016	02-07-2016	04-07-2016	08-07-2016	15-07-2016	22-07-2016	29-07-2016	26-08-2016	29-09-2016
11	C5	04-07-2016	05-07-2016	07-07-2016	11-07-2016	18-07-2016	25-07-2016	01-08-2016	29-08-2016	02-10-2016
12	F4	04-07-2016	05-07-2016	07-07-2016	11-07-2016	18-07-2016	25-07-2016	01-08-2016	29-08-2016	02-10-2016
13	CC4	05-07-2016	06-07-2016	08-07-2016	12-07-2016	19-07-2016	26-07-2016	02-08-2016	30-08-2016	03-10-2016
14	C6	05-07-2016	06-07-2016	08-07-2016	12-07-2016	19-07-2016	26-07-2016	02-08-2016	30-08-2016	03-10-2016
Estado fresco	Diâmetro de Espalhamento	NP EN 12350-8	x							
	Tempo de funil	NP EN 12350-9	x							
	Capacidade de passagem	NP EN 12350-10	x							
Moldagem...Desmoldagem		NP EN 196-1...	x	x						
Estado endurecido	Velocidade	NP EN 12504-4...			x	x	x	x	x	x
	Resistência à compressão	NP EN 196-1 / NP EN 12390-3						x		x

**Anexo B – Fichas técnicas dos materiais**

B.1 – Areia normalizada (argamassas)

B.2 – Caracterização dos agregados (betões)


B.3 – Cimento Portland CEM I 42,5R

B.4 – Fíler calcário

B.5 – Resíduo de FCC

B.6 – Superplastificante

B.1 – Areia normalizada (argamassas)



## Société Nouvelle du Littoral

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

<p style="font-size: small; margin: 0;">SABLE NORMALISE CEN CERTIFIE CONFORME – EN 196-1 par l'AFNOR et conforme ISO 679</p>	<h3 style="margin: 0;">CEN STANDARD SAND</h3> <p style="margin: 0;">CERTIFIED IN ACCORDANCE WITH EN 196-1 CONFORMING TO ISO 679</p>
<p style="font-size: x-small; margin: 0;">Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris (L.E.M.V.P.) 4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy 75014 PARIS</p>	<h3 style="margin: 0;">Methods of cement testing</h3> <p style="margin: 0;">Sand for strength measurements</p>

**1- CHARACTERISTICS :**

CEN Standard sand (ISO standard sand) is a natural sand, which is siliceous particularly its finest fractions. It is clean, the particles are generally isometric and rounded in shape. It is dried, screened and prepared in a modern workshop which offers every guarantee in terms of quality and consistency.

The sand is packaged in polyethylene bags each containing 1 350 ± 5 g.

Deliveries are made in boxes of 16 bags weighing 21.6 kg and in pallets of 2 to 54 boxes, suitably protected by a polyethylene cover (land transport) or reinforced boxes (shipping).

**2- CONTROLS**






The grading, measured by sieving, complies with the requirements of EN 196-1 (§5) and of ISO 679: 2009 (§5).

Square mesh Size (mm)	Cumulative (%) retained
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0


This analysis is complemented by bag mass controls, water content controls and strength controls, in accordance with EN 196-1 (§11) and ISO 679: 2009 (§11).

**3- CONFORMITY**

CEN standard conformity is carried out by L.E.M.V.P. (Material Test Laboratory), 4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy - 75014 PARIS  
 Production has been certified by AFNOR (Association Française de Normalisation), 11 Rue Francis de Pressensé – 93571 La Plaine Saint Denis Cédex.

S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
 Certifiée pour la PRÉPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANIQUES DES CIMENTS



N°10-10/11EN

## B.2 – Caracterização dos agregados (betões)

ISEL-TFM-35205

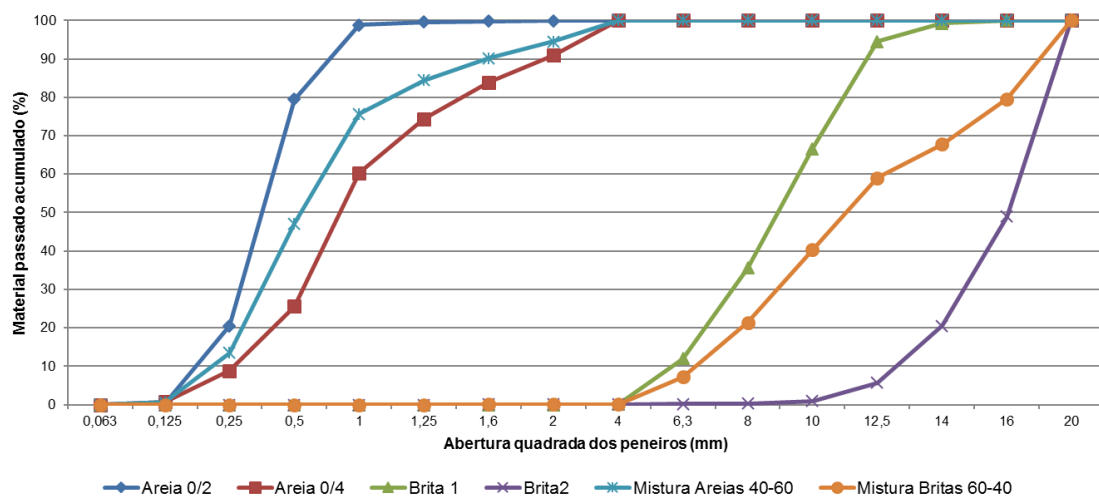
### Caraterização dos agregados

1. Agregado fino : constituído por 2 areias de origem calcária
  - Areia 0/2                                Areia Lavada 0/2 (Herdade da Mesquita), proveniente do Grupo SOARVAMIL, Seixal
  - Areia 0/4                                Areia Lavada 0/4 (Pinhal do Conde Cunha Nº4), proveniente do Grupo SOARVAMIL, Seixal
2. Agregado grosso: constituído por 2 britas de origem calcária
  - Brita 1                                    provenientes da Pedreira do Vale Grande nº2 Serra de Ota, Alenquer (Tel 263738568)
  - Brita 2

Norma		Propriedades	Valores especificados			
			Areia 0/2	Areia 0/4	Brita1	Brita2
NP EN 933-8	1	Equivalente de areia (%)	94,86	90,56	-	-
NP EN 933-2	2	Análise granulométrica ( módulo de finura)	2,016	3,553	4,919	8,231
	2	Máxima dimensão do agregado (mm)	1	2	12.5	20
	2	Teor de finos (%)	0,47%	0,47%	0,62%	0,59%
NP EN 12620	3	Categoria teor de finos (Q.11)	f <sub>3</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>1,5</sub>	f <sub>1,5</sub>
	3	Dimensão d/D (Q.2)	G <sub>F</sub> 85	G <sub>F</sub> 85	G <sub>C</sub> 90/15	G <sub>C</sub> 90/15
NP EN 1097-6	4.	Massa volúmica impermeável pa (kg/m3)	2646,72	2653,61	2710,02	2720,42
		Massa volúmica das partículas secas em estufas prd (kg/m3)	2613,61	2613,42	2634,28	2656,32
		Massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca pssd (kg/m3)	2626,11	2628,53	2662,18	2679,85
		Absorção de água (%)	0,48%	0,58%	1,06%	0,89%
NP EN 1097-3	5.	Baridade (não compactada) (kg/m3)	1510,67	1523,67	1351,37	1327,40
		Volume de vazios (%)	42%	42%	49%	50%
		Baridade compactada (kg/m3)	1594,44		1384,17	
			(40-60)%		(60-40)%	
			Areia 0/2-Areia 0/4		Brita1-Brita2	

Análise granulométrica dos agregados

Abertura peneiro (mm)	Material Pass Acum $\Sigma$ (%)					
	Areia 0/2	Areia 0/4	Brita 1	Brita2	Mistura Areias 40-60	Mistura Britas 60-40
20	100	100	100	100	100	100
16	100	100	100	49,00	100	79,60
14	100	100	99,24	20,56	100	67,77
12,5	100	100	94,51	5,68	100	58,98
10	100	100	66,62	0,98	100	40,37
8	100	100	35,57	0,27	100	21,45
6,3	100	100	11,97	0,16	100	7,25
4	100	100	0,12	0,11	100	0,11
2	99,87	90,91	0,04	0,09	94,49	0,06
1,6	99,79	83,84	0,04	0,08	90,22	0,05
1,25	99,55	74,36	0,00	0,00	84,44	0,00
1	98,83	60,29	0,00	0,00	75,71	0,00
0,5	79,48	25,58	0,00	0,00	47,14	0,00
0,25	20,54	8,90	0,00	0,00	13,56	0,00
0,125	0,35	0,77	0,00	0,00	0,60	0,00
0,063	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00



### B.3 – Cimento Portland CEM I 42,5R



## FICHA TÉCNICA

# Cimento Portland CEM I 42,5 R



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 ( $SO_3$ )  $\leq 4,0\%$   
Cloretos (Cl)  $\leq 0,10\%$

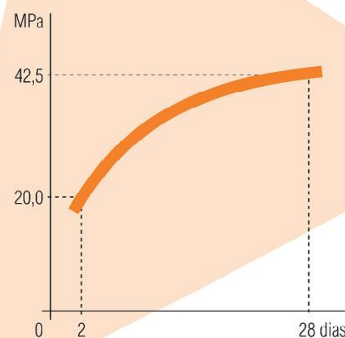
##### ▶ Físicas

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

Resistência mecânica à compressão  
Curva de crescimento mínimo



#### ▶ 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

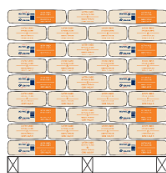
Cimento Portland  
CEM I 42,5 R



### ▶ Utilizações recomendadas

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

### ▶ Acondicionamento



Paleta planificada - Tara perdida  
72 Sacos de 25 kg – 1800 kg



Pacotão  
71 Sacos de 25 kg – 1775 kg

Camião de 25 toneladas com meios de descarga próprios devidamente selado



Granel  
25 toneladas

### ▶ Precauções na aplicação

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

### ▶ Contraindicações

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

### ▶ Ambiente e Segurança

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



uma empresa  InterCement

SERVIÇO COMERCIAL  
Rua Alexandre Herculano, 35 - 1250-009 LISBOA  
Tel.: (+351) 21 311 81 00 - Fax: (+351) 21 311 82 21

SERVIÇO TÉCNICO-COMERCIAL  
Rua Alexandre Herculano, 35 - 1250-009 LISBOA  
Tel.: (+351) 21 311 81 00 - Fax: (+351) 21 311 82 21

SERVIÇO DE CONTROLO DE VENDAS E CRÉDITO  
Av. Américo Duarte - S. Pedro Fins - 4425-504 MAIA  
Tel.: (+351) 22 968 80 00 - Fax: (+351) 22 967 18 38

[www.cimpor-portugal.pt](http://www.cimpor-portugal.pt)  
[Dcomercial@cimpor.com](mailto:Dcomercial@cimpor.com)

FT02\_2014/CT

B.4 – Fíler calcário

Declaração de Desempenho	
N.º DD-F-500001	
Código de identificação único do produto-tipo <b>Filler Calcário - Alhandra</b>	
Utilizações previstas EN 12620:2002 + A1:2008 Agregado para Betão	
Fabricante CIARGA, Argamassas Secas S.A. Rua Alexandre Herculano, 35 1250-009, Lisboa Portugal www.cimpor-portugal.pt	
Sistema(s) de avaliação e verificação da regularidade do desempenho (AVCP) Sistema 2+	
Norma harmonizada EN 12620:2002 + A1:2008	
Organismos notificados O organismo notificado 0866, realizou a certificação no âmbito do sistema 2+ e emitiu o certificado de conformidade do controlo de produção em fábrica n.º 0866-CPR-2010/CE.0140.	
Desempenhos declarados	
<b>Características essenciais</b>	<b>Desempenho</b>
Descrição petrográfica	Estrutura estratificada; superfície áspera de porosidade média a baixa; Rocha sedimentar quimigénica – Calcário
Absorção de água	< 1,5%
Massa volumica (Impermeável/Seca/Saturada) (±0,75)	2,70/2,65/2,68 Mg/m <sup>3</sup>
Cioretos solúveis	< 0,005 %
Teor total de Enxofre	< 0,04 %
Teor de Húmus	Isento
	<b>Especificações técnicas harmonizadas</b>
	EN 12620:2002 + A1:2008 (Características avaliadas na matéria-prima)
<b>Peneiro</b>	<b>Granulometria declarada (% acumulada)</b>
	Retida Passada
0,000 mm	100 % 0 %
0,083 mm	25 % 75 %
0,125 mm	10 % 90 %
2,000 mm	0 % 100 %
	<b>Mínimo (% passada acumulada)</b>
	0 %
	70 %
	85 %
	100 %
	<b>Limites EN 12620:2002 + A1:2008 (% passada acumulada)</b>
	= 0 %
	> 70 %
	> 85 %
	= 100 %
Libertação de substâncias perigosas	Ver Ficha de Dados de Segurança
O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados. A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (UE) n.º 305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima.	
Assinado por e em nome do fabricante por:	João Ghira – Diretor Geral Lisboa, 30/11/2015



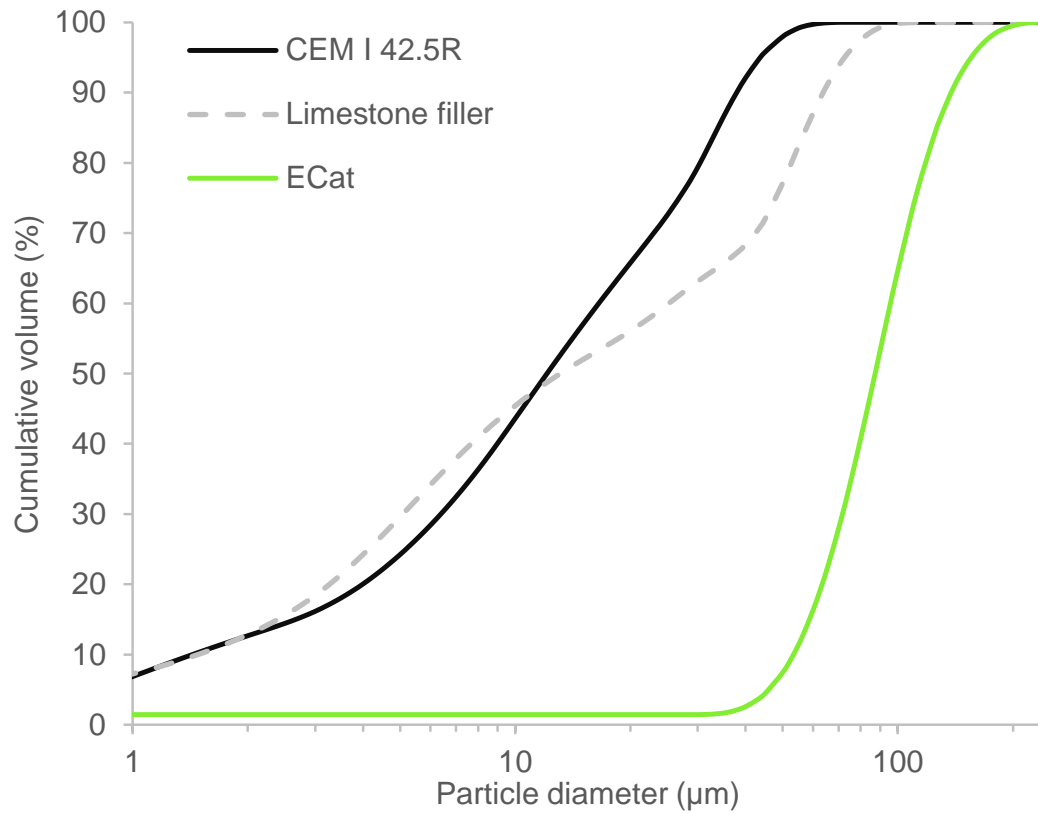
uma empresa InterCement



CIARGA - Argamassas Secas, S.A.  
Rua Alexandre Herculano, 35 | 1250-009 LISBOA | PORTUGAL | Tel. (351) 21 356 8100 | Fax. (351) 21 356 1381  
NIPC: 503 418 706  
FÁBRICA | E. Nacional N.º 10, Km 18,4 | 2600-470 ALHANDRA | Tel. (351) 21 951 90 30 | Fax (351) 21 951 18 50  
FÁBRICA | Av. Américo Duarte | 4425-504 ERMESINDE | Tel. (351) 22 969 87 10 | Fax (351) 22 969 87 29

### B.5 – Resíduo de FCC

Distribuição cumulativa de tamanho de partículas de cimento e de resíduo de FCC



(Fonte: C. Costa e S. Nunes, "Tailor-made SCC Incorporating Spent Equilibrium Catalyst from Oil Refinery," em Concrete Sustainability Conference, Washington, 2016.)

## B.6 – Superplastificante

Construction

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

CE

### SikaPlast® 898

*Powered by ViscoCrete®*

#### Superplastificante de elevado desempenho

---

**Descrição do produto** SikaPlast® 898 é um superplastificante forte redutor de água para betão.

---

**Utilizações** SikaPlast® 898 permite obter uma muito forte plastificação e uma longa manutenção da consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.

SikaPlast® 898 permite a fabricação de:

- Betões plásticos a fluidos.
- Betões com diferentes razões A/C.
- Betão bombeado para longas distâncias.
- Betão com agregados britados.
- Prefabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ.

Nos betões fluidos, SikaPlast® 898 confere à composição uma boa robustez às variações da água e dos diferentes constituintes e assim melhora a estabilidade, limitando os riscos de segregação, comparando com os adjuvantes inicialmente desenvolvidos à base de policarboxilatos.

---

**Características/Vantagens** SikaPlast® 898 é um superplastificante/forte redutor de água que confere ao betão as seguintes propriedades:

- Excelente trabalhabilidade conjugada com o elevado desempenho a nível do desenvolvimento das resistências.
- Alta redução de água, conforme a dosagem e a composição; daí resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compacidade elevada e de permeabilidade muito baixa.
- Boas resistências iniciais e finais.
- Excelente performance quer usado sozinho como combinado com outros adjuvantes.
- Maior robustez contra variações nos agregados e/ou diferentes tipos de cimento.
- Bom aspecto da superfície na descofragem
- Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em prefabricação, com bom desenvolvimento de resistências.

SikaPlast® 898 é isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.

---

**Certificados/Boletins de Ensaio** Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.


---

**Dados do produto**

**Aspecto / Cor** Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.

---

**Fornecimento** 214 kg (200 litros); 1070 kg (1 m<sup>3</sup>); granel.



SikaPlast® 898 1/3

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

**Importante**

- Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem óptima do adjuvante e sempre que se altere os componentes do betão ou a própria composição.
- Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se.

Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.

**Nota**

Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.

### Risco e segurança

**Medidas de segurança**

Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.

*"O produto está seguro na C<sup>a</sup> Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nº CH00003018LI05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".*

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.

### Marcação CE

A Norma Europeia EN 934-2:2003 "Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem" especifica as definições e os requisitos dos adjuvantes para uso no betão. Abrange adjuvantes para betão simples, armado e pré-esforçados usados no betão fabricado no local da obra, no betão pronto e no betão fabricado em centrais de produção de elementos prefabricados.

Nesta norma os requisitos de desempenho aplicam-se a adjuvantes usados no betão de consistência normal. Eles podem não ser aplicáveis a adjuvantes para outros tipos de betão tais como betões meio secos e de consistência terra húmida.



Sika Portugal, SA  
R. de Santarém, 113  
4400-292 V. N. Gaia  
Portugal  
Tel. +351 22 377 69 00  
Fax +351 22 370 20 12  
www.sika.pt



## Anexo C – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido das argamassas

### C.1 – Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas: diâmetro de espalhamento e tempo de funil

ISEL-TFM-35205

Ensaio no estado fresco

Espalhamento	NP EN 12350-8
Tempo de funil	NP EN 12350-9

Amostra	Local	Data	Hora	D1(mm)	D2(mm)	Dmédio(mm)	tf(s)	Amostra
AC	LAB_MC_ISEL	02-05-2016	13h30	250	255,0	252,5	5,75	AC
AO	LAB_MC_ISEL	02-05-2016	11h00	245	255,0	250,0	8,70	AO
AO_pmm	LAB_MC_ISEL	10-05-2016	11h15	245	245,0	245,0	8,03	AO_pmm
AC_exp						235,7	5,35	AC_exp

## C.2 – Resultados dos ensaios no estado endurecido das argamassas: velocidade de propagação de ultrassons e resistividade elétrica

ISEL-TFM-35205

Ensaio no estado endurecido

Resistividade	ASTM C597-09
Ultrassons	NP EN 12504-4

Amostra	Local	Data	Tensão(U)	Comp(m)	Área(m <sup>2</sup> )
AO1	LAB_MC_ISEL	02-05-2016	30	0,16	0,0016
AO_pmm7_pmm	LAB_MC_ISEL	10-05-2016	30	0,16	0,0016
AC	LAB_MC_ISEL	02-05-2016	30	0,16	0,0016

Dia 0	AO1	AO2	AO3	AO4	AO5	AO6
Peso(g)	545,00	545,00	545,00	557,67	557,67	557,67
Peso médio(g)	551,33			557,67		
Desv Padrão	6,33			0,00		

Dia 3	AO1	AO2	AO3	AO4	AO5	AO6
Peso(g)	547,26	546,65	545,19	554,03	559,23	563,04
Média	552,57			558,77		
Desv Padrão	6,76			3,69		
I(mA)	8,10	7,30	5,40	9,80	9,50	8,20
Resistividade (ohm.m)	37,04	41,10	55,56	30,61	31,58	36,59
Média	38,74			32,93		
Desv Padrão	8,30			2,62		
t1(μs)	45,80	47,70	46,50	46,20	44,40	46,00
Velocidade (m/s)	3493,45	3354,30	3440,86	3463,20	3603,60	3478,26
Média	3472,28			3515,02		
Desv Padrão	73,85			62,94		

Dia 7	AO1	AO2	AO3	AO4	AO5	AO6
Peso(g)	549,60	548,73	547,47	556,59	561,40	565,25
Média	554,84			561,08		
Desv Padrão	6,75			3,54		
I(mA)	5,90	8,00	6,80	6,90	5,80	6,40
Resistividade (ohm.m)	50,85	37,50	44,12	43,48	51,72	46,88
Média	45,76			47,36		
Desv Padrão	4,81			3,38		
t1(μs)	39,60	40,30	41,80	39,70	39,80	39,30
Velocidade (m/s)	4040,40	3970,22	3827,75	4030,23	4020,10	4071,25
Média	3993,33			4040,52		
Desv Padrão	79,91			22,11		

Dia 14	AO1	AO2	AO3	AO4	AO5	AO6
Peso(g)	551,30	550,72	548,88	557,96	563,42	566,94
Média	556,54			562,77		
Desv Padrão	6,80			3,69		
I(mA)	5,70	5,60	5,40	5,70	4,70	4,40
Resistividade (ohm.m)	52,63	53,57	55,56	52,63	63,83	68,18
Média	57,73			61,55		
Desv Padrão	6,06			6,55		
t1(μs)	36,60	37,20	36,50	36,20	36,80	37,60
Velocidade (m/s)	4371,58	4301,08	4383,56	4419,89	4347,83	4255,32
Média	4346,54			4341,01		
Desv Padrão	54,42			67,36		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

<b>Dia 21</b>	AO1	AO2	AO3	AO4	AO5	AO6
Peso(g)	551,98	551,23	549,84	558,84	563,92	567,48
Média	557,22			563,41		
Desv Padrão	6,72			3,55		
I(mA)	2,5	4,1	3,8	2,7	3,3	3
Resistividade (ohm.m)	120,00	73,17	78,95	111,11	90,91	100,00
Média	95,69			100,67		
Desv Padrão	16,62			8,26		
t1(μs)	36,6	37,2	36,9	36,9	36,7	36,7
Velocidade (m/s)	4371,58	4301,08	4336,04	4336,04	4359,67	4359,67
Média	4344,02			4351,80		
Desv Padrão	23,17			11,14		

<b>Dia 28</b>	AO1	AO2	AO3	AO4	AO5	AO6
Peso(g)	553,07	552,23	550,25	559,67	564,69	568,36
Média	558,05			564,24		
Desv Padrão	6,74			3,56		
I(mA)	3	3,4	3,2	3,1	2,4	2,6
Resistividade (ohm.m)	100,00	88,24	93,75	96,77	125,00	115,38
Média	103,19			112,39		
Desv Padrão	12,84			11,72		
t1(μs)	38,7	39	39,4	39,6	39	38,1
Velocidade (m/s)	4134,37	4102,56	4060,91	4040,40	4102,56	4199,48
Média	4106,71			4114,15		
Desv Padrão	51,48			65,45		

<b>Dia 56</b>	AO1	AO2	AO3	AO4	AO5	AO6
Peso(g)				559,77	564,8	568,35
Média				564,31		
Desv Padrão				3,52		
I(mA)				2,3	2,3	2
Resistividade (ohm.m)				130,43	130,43	150,00
Média				136,96		
Desv Padrão				9,22		
t1(μs)				36,8	37,1	36,2
Velocidade (m/s)				4347,83	4312,67	4419,89
Média				4360,13		
Desv Padrão				44,63		

<b>Dia 90</b>				AO4	AO5	AO6
Peso(g)				557	563	566
Média				562,00		
Desv Padrão				3,74		
I(mA)				1,2	1,3	1,1
Resistividade (ohm.m)				250,00	230,77	272,73
Média				251,17		
Desv Padrão				17,15		
t1(μs)				36,2	36,4	36,2
Velocidade (m/s)				4419,89	4395,60	4419,89
Média				4411,79		
Desv Padrão				11,45		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

<b>Dia 0</b>	AO_pmm7	AO_pmm8	AO_pmm9	AO_pmm10	AO_pmm11	AO_pmm12
Peso(g)	541,33	541,33	541,33	551,33	551,33	551,33
Peso médio(g)	546,33			551,33		
Desv Padrão	5,00			0,00		

<b>Dia 3</b>	AO_pmm7	AO_pmm8	AO_pmm9	AO_pmm10	AO_pmm11	AO_pmm12
Peso(g)	543,16	545,10	546,67	553,93	555,11	552,29
Média	549,38			553,78		
Desv Padrão	4,59			1,16		
I(mA)	9,20	8,50	9,00	9,70	9,80	10,00
Resistividade (ohm.m)	32,61	35,29	33,33	30,93	30,61	30,00
Média	32,13			30,51		
Desv Padrão	1,82			0,39		
t1(μs)	49,70	49,00	48,90	47,90	48,00	48,30
Velocidade (m/s)	3219,32	3265,31	3271,98	3340,29	3333,33	3312,63
Média	3290,48			3328,75		
Desv Padrão	42,52			11,75		

<b>Dia 7</b>	AO_pmm7	AO_pmm8	AO_pmm9	AO_pmm10	AO_pmm11	AO_pmm12
Peso(g)	545,85	547,47	548,65	556,22	557,25	557,64
Média	552,18			557,04		
Desv Padrão	4,94			0,60		
I(mA)	8,20	8,00	8,10	8,90	6,50	8,30
Resistividade (ohm.m)	36,59	37,50	37,04	33,71	46,15	36,14
Média	37,85			38,67		
Desv Padrão	3,90			5,39		
t1(μs)	41,80	42,90	42,00	42,10	41,30	42,30
Velocidade (m/s)	3827,75	3729,60	3809,52	3800,48	3874,09	3782,51
Média	3803,99			3819,02		
Desv Padrão	43,81			39,62		

<b>Dia 14</b>	AO_pmm7	AO_pmm8	AO_pmm9	AO_pmm10	AO_pmm11	AO_pmm12
Peso(g)	547,09	548,67	550,25	557,68	558,69	559,24
Média	553,60			558,54		
Desv Padrão	5,04			0,65		
I(mA)	6,2	5,9	6,2	5,6	6	6,4
Resistividade (ohm.m)	48,39	50,85	48,39	53,57	50,00	46,88
Média	49,68			50,15		
Desv Padrão	2,15			2,74		
t1(μs)	40,2	40,9	40,7	40,9	40,8	41,1
Velocidade (m/s)	3980,10	3911,98	3931,20	3911,98	3921,57	3892,94
Média	3924,96			3908,83		
Desv Padrão	27,24			11,90		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

<b>Dia 21</b>	AO_pmm7	AO_pmm8	AO_pmm9	AO_pmm10	AO_pmm11	AO_pmm12
Peso(g)	548,59	549,61	551,76	558,54	559,72	560,3
Média	554,75			559,52		
Desv Padrão	4,88			0,73		
I(mA)	4,5	4,4	4,3	3,6	4,2	4,4
Resistividade (ohm.m)	66,67	68,18	69,77	83,33	71,43	68,18
Média	71,26			74,31		
Desv Padrão	5,60			6,51		
t1(μs)	38,5	38,4	39,2	38,4	38,2	39,6
Velocidade (m/s)	4155,84	4166,67	4081,63	4166,67	4188,48	4040,40
Média	4133,28			4131,85		
Desv Padrão	53,35			65,27		

<b>Dia 28</b>	AO_pmm7	AO_pmm8	AO_pmm9	AO_pmm10	AO_pmm11	AO_pmm12
Peso(g)	548,14	549,53	551,41	559,03	559,94	560,56
Média	554,77			559,84		
Desv Padrão	5,18			0,63		
I(mA)	3,8	3,7	3,6	3,6	3,5	3,7
Resistividade (ohm.m)	78,95	81,08	83,33	83,33	85,71	81,08
Média	82,25			83,38		
Desv Padrão	2,16			1,89		
t1(μs)	38,9	38	38,2	39	38,6	38,5
Velocidade (m/s)	4113,11	4210,53	4188,48	4102,56	4145,08	4155,84
Média	4152,60			4134,50		
Desv Padrão	38,24			23,00		

<b>Dia 56</b>	AO_pmm7	AO_pmm8	AO_pmm9	AO_pmm10	AO_pmm11	AO_pmm12
Peso(g)				558,31	559,24	559,87
Média				559,14		
Desv Padrão				0,64		
I(mA)				2,2	2,5	2,3
Resistividade (ohm.m)				136,36	120,00	130,43
Média				128,93		
Desv Padrão				6,76		
t1(μs)				35,4	35,5	36
Velocidade (m/s)				4519,77	4507,04	4444,44
Média				4490,42		
Desv Padrão				32,92		

<b>Dia 90</b>				AO_pmm10	AO_pmm11	AO_pmm12
Peso(g)				556	557	557
Média				556,67		
Desv Padrão				0,47		
I(mA)				1,2	1,1	1,4
Resistividade (ohm.m)				250,00	272,73	214,29
Média				245,67		
Desv Padrão				24,05		
t1(μs)				36,7	36,6	36,7
Velocidade (m/s)				4359,67	4371,58	4359,67
Média				4363,64		
Desv Padrão				5,62		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

<b>Dia 0</b>	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6
Peso(g)	538,00	538,00	538,00	543,67	543,67	543,67
Peso médio(g)	540,83			543,67		
Desv Padrão	2,83			0,00		

<b>Dia 3</b>	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6
Peso(g)	541,26	540,27	540,42	545,14	545,87	550,61
Média	543,93			547,21		
Desv Padrão	3,71			2,42		
I(mA)	9,30	9,00	9,40	7,90	8,50	8,40
Resistividade (ohm.m)	32,26	33,33	31,91	37,97	35,29	35,71
Média	34,41			36,33		
Desv Padrão	2,13			1,18		
t1(μs)	48,00	47,60	49,60	47,60	47,80	47,00
Velocidade (m/s)	3333,33	3361,34	3225,81	3361,34	3347,28	3404,26
Média	3338,89			3370,96		
Desv Padrão	55,03			24,23		

<b>Dia 7</b>	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6
Peso(g)	543,27	542,25	541,91	546,82	547,96	551,97
Média	545,70			548,92		
Desv Padrão	3,60			2,21		
I(mA)	6,70	7,50	7,00	6,20	7,20	7,00
Resistividade (ohm.m)	44,78	40,00	42,86	48,39	41,67	42,86
Média	43,42			44,30		
Desv Padrão	2,64			2,93		
t1(μs)	41,60	43,30	42,30	42,40	42,80	41,90
Velocidade (m/s)	3846,15	3695,15	3782,51	3773,58	3738,32	3818,62
Média	3775,72			3776,84		
Desv Padrão	49,57			32,86		

<b>Dia 14</b>	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6
Peso(g)	544,75	543,74	543,54	548,34	549,21	553,45
Média	547,17			550,33		
Desv Padrão	3,55			2,23		
I(mA)	4,70	5,30	6,30	4,70	5,80	5,90
Resistividade (ohm.m)	63,83	56,60	47,62	63,83	51,72	50,85
Média	55,74			55,47		
Desv Padrão	6,29			5,92		
t1(μs)	38,50	39,00	38,30	39,10	39,30	38,00
Velocidade (m/s)	4155,84	4102,56	4177,55	4092,07	4071,25	4210,53
Média	4134,97			4124,61		
Desv Padrão	49,85			61,34		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

<b>Dia 21</b>	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6
Peso(g)	545,37	544,25	544,18	549,03	550,14	554,35
Média	547,89			551,17		
Desv Padrão	3,68			2,29		
I(mA)	3,2	3,2	4,4	3,8	3,6	3
Resistividade (ohm.m)	93,75	93,75	68,18	78,95	83,33	100,00
Média	86,33			87,43		
Desv Padrão	10,72			9,07		
t1(μs)	38,6	38,3	38,6	39,3	38,4	38,1
Velocidade (m/s)	4145,08	4177,55	4145,08	4071,25	4166,67	4199,48
Média	4150,85			4145,80		
Desv Padrão	40,27			54,39		

<b>Dia 28</b>	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6
Peso(g)	546,25	545,14	544,63	549,77	550,9	554,94
Média	548,61			551,87		
Desv Padrão	3,65			2,22		
I(mA)	2,9	3,2	3,7	3,1	2,8	3,7
Resistividade (ohm.m)	103,45	93,75	81,08	96,77	107,14	81,08
Média	93,88			95,00		
Desv Padrão	10,03			10,71		
t1(μs)	39,3	40	39,9	39,7	39,3	38,6
Velocidade (m/s)	4071,25	4000,00	4010,03	4030,23	4071,25	4145,08
Média	4054,64			4082,18		
Desv Padrão	48,82			47,52		

<b>Dia 56</b>	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6
Peso(g)				549,77	550,97	555,3
Média				552,01		
Desv Padrão				2,38		
I(mA)				2,1	1,8	1,8
Resistividade (ohm.m)				142,86	166,67	166,67
Média				158,73		
Desv Padrão				11,22		
t1(μs)				38	38,3	37,8
Velocidade (m/s)				4210,53	4177,55	4232,80
Média				4206,96		
Desv Padrão				22,70		

<b>Dia 90</b>				AC4	AC5	AC6
Peso(g)				548	548	552
Média				549,33		
Desv Padrão				1,89		
I(mA)				1,4	1,3	1,3
Resistividade (ohm.m)				214,29	230,77	230,77
Média				225,27		
Desv Padrão				7,77		
t1(μs)				37,4	37	36,8
Velocidade (m/s)				4278,07	4324,32	4347,83
Média				4316,74		
Desv Padrão				28,98		

C.3 – Resultados dos ensaios no estado endurecido das argamassas: resistência mecânica à flexão e à compressão

ISEL-TFM-35205

Ensaio no estado endurecido

Resistência à compressão	NP EN 196-1
--------------------------	-------------

Amostra	Local	Data	b - secção (mm)	área (mm <sup>2</sup> )	l - apoios (mm)
AO1	LAB_MC_ISEL	02-06-2016	40	1600	100
AO_pmm7	LAB_MC_ISEL	07-06-2016	40	1600	100
AC	LAB_MC_ISEL	02-06-2016	40	1600	100

Dia 28	AO1	AO2	AO3
	Flexão		
Carga (N)	3555	3450	3425
tempo(s)	59,77	60,84	58,36
velocidade (N/s)	59,48	56,71	58,69
Cumprir limite 50 ± 10 (N/s)	sim	sim	sim
Rf (MPa)	8,33	8,09	8,03
Rf média (MPa)	8,15		
Desv Padrão	0,13		
	Compressão		
Carga 1 (N)	87680	88330	89720
tempo(s)	36,53	36,80	37,38
velocidade (N/s)	2400,00	2400,00	2400,00
Cumprir limite 2400 ± 200 (N/s)	sim	sim	sim
Rc 1 (MPa)	54,80	55,21	56,08
Carga 2 (N)	87280	87160	88830
tempo(s)	36,37	36,32	37,01
velocidade (N/s)	2400,00	2400,00	2400,00
Cumprir limite 2400 ± 200 (N/s)	sim	sim	sim
Rc2 (MPa)	54,55	54,48	55,52
Rc média (MPa)	55,10		
Desv Padrão	0,48		

AO_pmm7	AO_pmm8	AO_pmm9
Flexão		
3200	3300	3275
56,64	58,97	61,07
56,50	55,96	53,63
sim	sim	sim
7,50	7,73	7,68
7,64		
0,10		
Compressão		
84990	85400	82310
35,41	35,58	34,30
2400,00	2400,00	2400,00
sim	sim	sim
53,12	53,38	51,44
83280	80690	85120
34,70	33,62	35,47
2400,00	2400,00	2400,00
sim	sim	sim
52,05	50,43	53,20
52,27		
1,14		

Dia 28	AC1	AC2	AC3
	Flexão		
Carga (N)	3070	3200	3100
tempo(s)	67,88	63,81	60,37
velocidade (N/s)	45,23	50,15	51,35
Cumprir limite 50 ± 10 (N/s)	sim	sim	sim
Rf (MPa)	7,20	7,50	7,27
Rf média (MPa)	7,32		
Desv Padrão	0,13		
	Compressão		
Carga 1 (N)	75000	73500	72420
tempo(s)	31,25	30,63	30,18
velocidade (N/s)	2400,00	2400,00	2400,00
Cumprir limite 2400 ± 200 (N/s)	sim	sim	sim
Rc 1 (MPa)	46,88	45,94	45,26
Carga 2 (N)	75290	68420	73420
tempo(s)	31,37	28,51	30,59
velocidade (N/s)	2400,00	2400,00	2400,00
Cumprir limite 2400 ± 200 (N/s)	sim	sim	sim
Rc (MPa)	47,05625	42,7625	45,8875
Rc média (MPa)	45,63		
Desv Padrão	1,81		

Dia 90	AO4	AO5	AO6
	Flexão		
Carga (N)	3673	3876	3720
tempo(s)	65	65	65
velocidade (N/s)	56,51	59,63	57,23
Cumprir limite 50 ± 10 (N/s)	sim	sim	sim
Rf (MPa)	8,61	9,08	8,72
Rf média (MPa)	8,80		
Desv Padrão	0,20		
	Compressão		
Carga 1 (N)	104500	107360	113780
tempo(s)	43,54	44,73	47,41
velocidade (N/s)	2400,00	2400,00	2400,00
Cumprir limite 2400 ± 200 (N/s)	sim	sim	sim
Rc 1 (MPa)	65,3125	67,1	71,1125
Carga 2 (N)	104840	104270	114650
tempo(s)	43,68	43,45	47,77
velocidade (N/s)	2400,00	2400,00	2400,00
Cumprir limite 2400 ± 200 (N/s)	sim	sim	sim
Rc2 (MPa)	65,525	65,16875	71,65625
Rc média (MPa)	67,65		
Desv Padrão	2,98		

AO_pmm10	AO_pmm11	AO_pmm12
	Flexão	
3533	3646	3882
60	65	70
58,88	56,09	55,46
sim	sim	sim
8,28	8,55	9,10
	8,64	
	0,34	
	Compressão	
107410	109230	107040
44,75	45,51	44,60
2400,00	2400,00	2400,00
sim	sim	sim
67,13125	68,26875	66,9
112260	111710	107230
46,78	46,55	44,68
2400,00	2400,00	2400,00
sim	sim	sim
70,1625	69,81875	67,01875
	68,22	
	1,41	

Dia 90	AC4	AC5	AC6
	Flexão		
Carga (N)	3710	3428	3588
tempo(s)	65	60	60
velocidade (N/s)	57,08	57,13	59,80
Cumprir limite 50 ± 10 (N/s)	sim	sim	sim
Rf (MPa)	8,70	8,03	8,41
Rf média (MPa)	8,38		
Desv Padrão	0,27		
	Compressão		
Carga 1 (N)	92330	91250	97330
tempo(s)	38,47	38,02	40,55
velocidade (N/s)	2400,00	2400,00	2400,00
Cumprir limite 2400 ± 200 (N/s)	sim	sim	sim
Rc 1 (MPa)	57,70625	57,03125	60,83125
Carga 2 (N)	92080	90900	100230
tempo(s)	38,37	37,88	41,76
velocidade (N/s)	2400,00	2400,00	2400,00
Cumprir limite 2400 ± 200 (N/s)	sim	sim	sim
Rc2 (MPa)	57,55	56,8125	62,64375
Rc média (MPa)	58,76		
Desv Padrão	2,59		

## Anexo D – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido dos betões

### D.1 – Resultados dos ensaios no estado fresco dos betões: diâmetro de espalhamento, tempo de funil e capacidade de passagem na caixa L

ISEL - TFM - 35205

Ensaio no estado fresco

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
		Amostra	C1	F1	CC1	C2	F2	CC2	C3	F3	C4	CC3	C5	F4	CC4	C6	
		Data	15-06-2016	17-06-2016	17-06-2016	22-06-2016	23-06-2016	24-06-2016	28-06-2016	01-07-2016	01-07-2016	01-07-2016	04-07-2016	04-07-2016	05-07-2016	05-07-2016	
NP EN 12350-8	Diâmetro de espalhamento	Hora	13h00	10h30	13h00	10h30	11h15	13h30	11h00	10h00	13h30	11h00	11h00	13h20	11h30	13h15	
		D1 (mm)	720	740	770	700	750	690	700	600	730	760	700	550	500	700	
		D2 (mm)	710	740	770	750	760	720	700	620	740	800	700	570	500	720	
		t500 (s)	3,71	3,11	1,54	4,05	1,78	2,41	2,96	6,45	2,20	2,05	2,88	7,55	10,45	1,72	
		D (mm)	715	740	770	725	755	705	700	610	735	780	700	560	500	710	
NP EN 206-9	Classes de consistência	Espalhamento	SF2	SF2	SF3	SF2	SF2	SF2	SF2	SF1	SF2	SF3	SF2	SF1	SF1	SF2	
		Viscosidade	VS2	VS2	VS1	VS2	VS1	VS2	VS2	VS2	VS2	VS2	VS2	VS2	VS2	VS2	VS1
NP EN 12350-9	Funil V	tf (s)	6,65	7,59	5,88	7,83	5,48	8,81	7,01	27,30	6,55	5,98	6,09	18,08	104,5	6,5	
NP EN 206-9	Classes	Viscosidade	VF1	VF1	VF1	VF1	VF1	VF1	VF1	sem classe	VF1	VF1	VF1	VF2	sem classe	VF1	
NP EN 12350-10	Caixa L - 3 varões	ΔH1 - vertical (mm)	495	505	510	505	515	510	510	450	510	510	510	470	560	510	
		ΔH2 - horizontal (mm)	65	60	75	65	70	70	75	100	70	60	70	70	130	130	70
		H1(mm)	105	95	90	95	85	90	90	150	90	90	90	90	130	40	90
		H2(mm)	85	90	75	85	80	80	75	50	80	90	80	80	80	20	80
		PL	0,81	0,95	0,83	0,89	0,94	0,89	0,83	0,33	0,89	1,00	0,89	0,62	0,50	0,89	
NP EN 206-9	Classes	Passagem	PL2	PL2	PL2	PL2	PL2	PL2	PL2	sem classe	PL2	PL2	PL2	sem classe	sem classe	PL2	

D.2 – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos betões: velocidade de propagação de ultrassons

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C1	F1	CC1	C2	F2	CC2	C3	F3	C4	CC3	C5	F4	CC4	C6

ISEL - TFM - 35205

Ensaio estado endurecido

Velocidade de ultrassons	NP EN 12504-4
--------------------------	---------------

Dimensões dos provetes cúbicos

Comp(m)	Área (mm <sup>2</sup> )	Vol(m <sup>3</sup> )
0,15	22500	0,003375

1	<b>C1</b>								
<b>Dia 3</b>	C1-11	C1-12	C1-13	C1-21	C1-22	C1-23	C1-31	C1-32	C1-33
t1(μs)	33,80			33,90			35,00		
Velocidade(mm/μs)	4437,87			4424,78			4285,71		
Média	4382,79								
Desv Padrão	68,85								

<b>Dia 7</b>	C1-11	C1-12	C1-13	C1-21	C1-22	C1-23	C1-31	C1-32	C1-33
t1(μs)	29,80			31,80			31,40		
Velocidade(mm/μs)	5033,56			4716,98			4777,07		
Média	4842,54								
Desv Padrão	137,28								

<b>Dia 14</b>	C1-11	C1-12	C1-13	C1-21	C1-22	C1-23	C1-31	C1-32	C1-33
t1(μs)	32,00			31,70			32,70		
Velocidade(mm/μs)	4687,50			4731,86			4587,16		
Média	4668,84								
Desv Padrão	60,53								

<b>Dia 21</b>	C1-11	C1-12	C1-13	C1-21	C1-22	C1-23	C1-31	C1-32	C1-33
t1(μs)	29,50			30,50			31,30		
Velocidade(mm/μs)	5084,75			4918,03			4792,33		
Média	4931,70								
Desv Padrão	119,77								

<b>Dia 28</b>	C1-11	C1-12	C1-13	C1-21	C1-22	C1-23	C1-31	C1-32	C1-33
t1(μs)	30,90			29,70			30,90		
Velocidade(mm/μs)	4854,37			5050,51			4854,37		
Média	4919,75								
Desv Padrão	92,46								

<b>Dia 90</b>	C1-11	C1-12	C1-13	C1-21	C1-22	C1-23	C1-31	C1-32	C1-33
t1(μs)	29,70			29,50			30,20		
Velocidade(mm/μs)	5050,51			5084,75			4966,89		
Média	5034,05								
Desv Padrão	49,50								

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

2	F1								
Dia 3	F1-11	F1-12	F1-13	F1-21	F1-22	F1-23	F1-31	F1-32	F1-33
t1( $\mu$ s)	32,90			32,90			32,80		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4559,27			4559,27			4573,17		
Média	4563,90								
Desv Padrão	6,55								

Dia 7	F1-11	F1-12	F1-13	F1-21	F1-22	F1-23	F1-31	F1-32	F1-33
t1( $\mu$ s)	32,10			32,90			33,40		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4672,90			4559,27			4491,02		
Média	4574,40								
Desv Padrão	75,02								

Dia 14	F1-11	F1-12	F1-13	F1-21	F1-22	F1-23	F1-31	F1-32	F1-33
t1( $\mu$ s)	30,70			30,40			32,40		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4885,99			4934,21			4629,63		
Média	4816,61								
Desv Padrão	133,67								

Dia 21	F1-11	F1-12	F1-13	F1-21	F1-22	F1-23	F1-31	F1-32	F1-33
t1( $\mu$ s)	31,40			31,40			31,10		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4777,07			4777,07			4823,15		
Média	4792,43								
Desv Padrão	21,72								

Dia 28	F1-11	F1-12	F1-13	F1-21	F1-22	F1-23	F1-31	F1-32	F1-33
t1( $\mu$ s)	30,30			30,80			30,90		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4950,50			4870,13			4854,37		
Média	4891,66								
Desv Padrão	42,09								

Dia 90	F1-11	F1-12	F1-13	F1-21	F1-22	F1-23	F1-31	F1-32	F1-33
t1( $\mu$ s)	30,00			30,80			30,90		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	5000,00			4870,13			4854,37		
Média	4908,17								
Desv Padrão	65,25								

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

3	CC1								
Dia 3	CC1-11	CC1-12	CC1-13	CC1-21	CC1-22	CC1-23	CC1-31	CC1-32	CC1-33
t1( $\mu$ s)	33,90			34,90			33,40		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4424,78			4297,99			4491,02		
Média	4404,60								
Desv Padrão	80,08								

Dia 7	CC1-11	CC1-12	CC1-13	CC1-21	CC1-22	CC1-23	CC1-31	CC1-32	CC1-33
t1( $\mu$ s)	34,60			34,70			34,40		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4335,26			4322,77			4360,47		
Média	4339,50								
Desv Padrão	15,68								

Dia 14	CC1-11	CC1-12	CC1-13	CC1-21	CC1-22	CC1-23	CC1-31	CC1-32	CC1-33
t1( $\mu$ s)	31,70			34,30			31,50		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4731,86			4373,18			4761,90		
Média	4622,31								
Desv Padrão	176,59								

Dia 21	CC1-11	CC1-12	CC1-13	CC1-21	CC1-22	CC1-23	CC1-31	CC1-32	CC1-33
t1( $\mu$ s)	31,60			32,20			31,50		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4746,84			4658,39			4761,90		
Média	4722,38								
Desv Padrão	45,66								

Dia 28	CC1-11	CC1-12	CC1-13	CC1-21	CC1-22	CC1-23	CC1-31	CC1-32	CC1-33
t1( $\mu$ s)	31,20			31,10			31,10		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4807,69			4823,15			4823,15		
Média	4818,00								
Desv Padrão	7,29								

Dia 90	CC1-11	CC1-12	CC1-13	CC1-21	CC1-22	CC1-23	CC1-31	CC1-32	CC1-33
t1( $\mu$ s)	31,70			31,80			31,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4731,86			4716,98			4746,84		
Média	4731,89								
Desv Padrão	12,19								

4	C2								
Dia 3	C2-11	C2-12	C2-13	C2-21	C2-22	C2-23	C2-31	C2-32	C2-33
t1( $\mu$ s)	33,50			33,20			33,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4477,61			4518,07			4464,29		
Média	4486,66								
Desv Padrão	22,87								

Dia 7	C2-11	C2-12	C2-13	C2-21	C2-22	C2-23	C2-31	C2-32	C2-33
t1( $\mu$ s)	32,80			32,50			32,40		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4573,17			4615,38			4629,63		
Média	4606,06								
Desv Padrão	23,97								

Dia 14	C2-11	C2-12	C2-13	C2-21	C2-22	C2-23	C2-31	C2-32	C2-33
t1( $\mu$ s)	31,90			31,80			31,80		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4702,19			4716,98			4716,98		
Média	4712,05								
Desv Padrão	6,97								

Dia 21	C2-11	C2-12	C2-13	C2-21	C2-22	C2-23	C2-31	C2-32	C2-33
t1( $\mu$ s)	30,40			30,90			30,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4934,21			4854,37			4901,96		
Média	4896,85								
Desv Padrão	32,80								

Dia 28	C2-11	C2-12	C2-13	C2-21	C2-22	C2-23	C2-31	C2-32	C2-33
t1( $\mu$ s)	29,20			29,70			30,20		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	5136,99			5050,51			4966,89		
Média	5051,46								
Desv Padrão	69,45								

Dia 90	C2-11	C2-12	C2-13	C2-21	C2-22	C2-23	C2-31	C2-32	C2-33
t1( $\mu$ s)	30,20			30,30			30,90		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4966,89			4950,50			4854,37		
Média	4923,92								
Desv Padrão	49,63								

5	F2								
Dia 3	F2-11	F2-12	F2-13	F2-21	F2-22	F2-23	F2-31	F2-32	F2-33
t1( $\mu$ s)	32,80			33,00			33,30		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4573,17			4545,45			4504,50		
Média	4541,04								
Desv Padrão	28,21								

Dia 7	F2-11	F2-12	F2-13	F2-21	F2-22	F2-23	F2-31	F2-32	F2-33
t1( $\mu$ s)	31,40			31,70			32,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4777,07			4731,86			4687,50		
Média	4732,14								
Desv Padrão	36,57								

Dia 14	F2-11	F2-12	F2-13	F2-21	F2-22	F2-23	F2-31	F2-32	F2-33
t1( $\mu$ s)	31,00			30,30			30,90		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4838,71			4950,50			4854,37		
Média	4881,19								
Desv Padrão	49,42								

Dia 21	F2-11	F2-12	F2-13	F2-21	F2-22	F2-23	F2-31	F2-32	F2-33
t1( $\mu$ s)	30,30			30,00			29,70		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4950,50			5000,00			5050,51		
Média	5000,33								
Desv Padrão	40,83								

Dia 28	F2-11	F2-12	F2-13	F2-21	F2-22	F2-23	F2-31	F2-32	F2-33
t1( $\mu$ s)	30,10			30,20			30,10		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4983,39			4966,89			4983,39		
Média	4977,89								
Desv Padrão	7,78								

Dia 90	F2-11	F2-12	F2-13	F2-21	F2-22	F2-23	F2-31	F2-32	F2-33
t1( $\mu$ s)	28,20			28,60			28,40		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	5319,15			5244,76			5281,69		
Média	5281,86								
Desv Padrão	30,37								

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

6	CC2								
Dia 3	CC2-11	CC2-12	CC2-13	CC2-21	CC2-22	CC2-23	CC2-31	CC2-32	CC2-33
t1( $\mu$ s)	34,10			35,50			34,70		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4398,83			4225,35			4322,77		
Média	4315,65								
Desv Padrão	71,00								

Dia 7	CC2-11	CC2-12	CC2-13	CC2-21	CC2-22	CC2-23	CC2-31	CC2-32	CC2-33
t1( $\mu$ s)	32,40			31,90			32,20		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4629,63			4702,19			4658,39		
Média	4663,40								
Desv Padrão	29,84								

Dia 14	CC2-11	CC2-12	CC2-13	CC2-21	CC2-22	CC2-23	CC2-31	CC2-32	CC2-33
t1( $\mu$ s)	31,50			31,80			32,30		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4761,90			4716,98			4643,96		
Média	4707,62								
Desv Padrão	48,60								

Dia 21	CC2-11	CC2-12	CC2-13	CC2-21	CC2-22	CC2-23	CC2-31	CC2-32	CC2-33
t1( $\mu$ s)	30,70			31,20			31,30		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4885,99			4807,69			4792,33		
Média	4828,67								
Desv Padrão	41,01								

Dia 28	CC2-11	CC2-12	CC2-13	CC2-21	CC2-22	CC2-23	CC2-31	CC2-32	CC2-33
t1( $\mu$ s)	30,40			30,20			30,70		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4934,21			4966,89			4885,99		
Média	4929,03								
Desv Padrão	33,23								

Dia 90	CC2-11	CC2-12	CC2-13	CC2-21	CC2-22	CC2-23	CC2-31	CC2-32	CC2-33
t1( $\mu$ s)	30,10			29,10			30,40		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4983,39			5154,64			4934,21		
Média	5024,08								
Desv Padrão	94,48								

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

7	C3								
Dia 3	C3-11	C3-12	C3-13	C3-21	C3-22	C3-23	C3-31	C3-32	C3-33
t1( $\mu$ s)	32,00			32,40			32,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4687,50			4629,63			4601,23		
Média	4639,45								
Desv Padrão	35,90								

Dia 7	C3-11	C3-12	C3-13	C3-21	C3-22	C3-23	C3-31	C3-32	C3-33
t1( $\mu$ s)	31,60			31,70			31,90		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4746,84			4731,86			4702,19		
Média	4726,96								
Desv Padrão	18,55								

Dia 14	C3-11	C3-12	C3-13	C3-21	C3-22	C3-23	C3-31	C3-32	C3-33
t1( $\mu$ s)	30,40			30,40			30,70		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4934,21			4934,21			4885,99		
Média	4918,14								
Desv Padrão	22,73								

Dia 21	C3-11	C3-12	C3-13	C3-21	C3-22	C3-23	C3-31	C3-32	C3-33
t1( $\mu$ s)	28,60			30,30			30,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	5244,76			4950,50			5000,00		
Média	5065,08								
Desv Padrão	128,64								

Dia 28	C3-11	C3-12	C3-13	C3-21	C3-22	C3-23	C3-31	C3-32	C3-33
t1( $\mu$ s)	30,80			30,80			30,70		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4870,13			4870,13			4885,99		
Média	4875,42								
Desv Padrão	7,48								

Dia 90	C3-11	C3-12	C3-13	C3-21	C3-22	C3-23	C3-31	C3-32	C3-33
t1( $\mu$ s)	30,10			30,10			29,50		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4983,39			4983,39			5084,75		
Média	5017,17								
Desv Padrão	47,78								

8	F3								
Dia 3	F3-11	F3-12	F3-13	F3-21	F3-22	F3-23	F3-31	F3-32	F3-33
t1( $\mu$ s)	35,50			35,00			35,20		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4225,35			4285,71			4261,36		
Média	4257,48								
Desv Padrão	24,80								

Dia 7	F3-11	F3-12	F3-13	F3-21	F3-22	F3-23	F3-31	F3-32	F3-33
t1( $\mu$ s)	32,30			32,00			32,10		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4643,96			4687,50			4672,90		
Média	4668,12								
Desv Padrão	18,09								

Dia 14	F3-11	F3-12	F3-13	F3-21	F3-22	F3-23	F3-31	F3-32	F3-33
t1( $\mu$ s)	31,20			31,40			31,30		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4807,69			4777,07			4792,33		
Média	4792,36								
Desv Padrão	12,50								

Dia 21	F3-11	F3-12	F3-13	F3-21	F3-22	F3-23	F3-31	F3-32	F3-33
t1( $\mu$ s)	31,40			30,80			31,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4777,07			4870,13			4838,71		
Média	4828,64								
Desv Padrão	38,65								

Dia 28	F3-11	F3-12	F3-13	F3-21	F3-22	F3-23	F3-31	F3-32	F3-33
t1( $\mu$ s)	31,10			31,10			31,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4823,15			4823,15			4838,71		
Média	4828,34								
Desv Padrão	7,33								

Dia 90	F3-11	F3-12	F3-13	F3-21	F3-22	F3-23	F3-31	F3-32	F3-33
t1( $\mu$ s)	30,70			30,60			30,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4885,99			4901,96			4901,96		
Média	4896,64								
Desv Padrão	7,53								

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

9	C4								
Dia 3	C4-11	C4-12	C4-13	C4-21	C4-22	C4-23	C4-31	C4-32	C4-33
t1( $\mu$ s)	32,70			33,50			33,50		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4587,16			4477,61			4477,61		
Média	4514,13								
Desv Padrão	51,64								

Dia 7	C4-11	C4-12	C4-13	C4-21	C4-22	C4-23	C4-31	C4-32	C4-33
t1( $\mu$ s)	33,10			33,30			33,10		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4531,72			4504,50			4531,72		
Média	4522,65								
Desv Padrão	12,83								

Dia 14	C4-11	C4-12	C4-13	C4-21	C4-22	C4-23	C4-31	C4-32	C4-33
t1( $\mu$ s)	31,10			31,90			30,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4823,15			4702,19			4901,96		
Média	4809,10								
Desv Padrão	82,16								

Dia 21	C4-11	C4-12	C4-13	C4-21	C4-22	C4-23	C4-31	C4-32	C4-33
t1( $\mu$ s)	31,10			31,30			30,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4823,15			4792,33			4901,96		
Média	4839,15								
Desv Padrão	46,16								

Dia 28	C4-11	C4-12	C4-13	C4-21	C4-22	C4-23	C4-31	C4-32	C4-33
t1( $\mu$ s)	31,20			31,00			30,90		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4807,69			4838,71			4854,37		
Média	4833,59								
Desv Padrão	19,40								

Dia 90	C4-11	C4-12	C4-13	C4-21	C4-22	C4-23	C4-31	C4-32	C4-33
t1( $\mu$ s)	31,00			31,10			31,20		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4838,71			4823,15			4807,69		
Média	4823,18								
Desv Padrão	12,66								

10	CC3								
Dia 3	CC3-11	CC3-12	CC3-13	CC3-21	CC3-22	CC3-23	CC3-31	CC3-32	CC3-33
t1( $\mu$ s)	34,60			34,10			35,30		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4335,26			4398,83			4249,29		
Média	4327,79								
Desv Padrão	61,28								

Dia 7	CC3-11	CC3-12	CC3-13	CC3-21	CC3-22	CC3-23	CC3-31	CC3-32	CC3-33
t1( $\mu$ s)	31,40			32,70			32,50		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4777,07			4587,16			4615,38		
Média	4659,87								
Desv Padrão	83,67								

Dia 14	CC3-11	CC3-12	CC3-13	CC3-21	CC3-22	CC3-23	CC3-31	CC3-32	CC3-33
t1( $\mu$ s)	30,60			31,30			31,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4901,96			4792,33			4838,71		
Média	4844,33								
Desv Padrão	44,93								

Dia 21	CC3-11	CC3-12	CC3-13	CC3-21	CC3-22	CC3-23	CC3-31	CC3-32	CC3-33
t1( $\mu$ s)	31,10			31,30			30,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4823,15			4792,33			4901,96		
Média	4839,15								
Desv Padrão	46,16								

Dia 28	CC3-11	CC3-12	CC3-13	CC3-21	CC3-22	CC3-23	CC3-31	CC3-32	CC3-33
t1( $\mu$ s)	30,70			30,50			30,80		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4885,99			4918,03			4870,13		
Média	4891,39								
Desv Padrão	19,92								

Dia 90	CC3-11	CC3-12	CC3-13	CC3-21	CC3-22	CC3-23	CC3-31	CC3-32	CC3-33
t1( $\mu$ s)	30,10			30,30			30,30		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4983,39			4950,50			4950,50		
Média	4961,46								
Desv Padrão	15,51								

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

11	C5								
Dia 3	C5-11	C5-12	C5-13	C5-21	C5-22	C5-23	C5-31	C5-32	C5-33
t1( $\mu$ s)	33,20			33,40			32,70		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4518,07			4491,02			4587,16		
Média	4532,08								
Desv Padrão	40,48								

Dia 7	C5-11	C5-12	C5-13	C5-21	C5-22	C5-23	C5-31	C5-32	C5-33
t1( $\mu$ s)	31,20			30,70			32,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4807,69			4885,99			4687,50		
Média	4793,73								
Desv Padrão	81,63								

Dia 14	C5-11	C5-12	C5-13	C5-21	C5-22	C5-23	C5-31	C5-32	C5-33
t1( $\mu$ s)	31,40			31,90			32,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4777,07			4702,19			4687,50		
Média	4722,25								
Desv Padrão	39,22								

Dia 21	C5-11	C5-12	C5-13	C5-21	C5-22	C5-23	C5-31	C5-32	C5-33
t1( $\mu$ s)	31,20			31,00			31,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4807,69			4838,71			4746,84		
Média	4797,75								
Desv Padrão	38,16								

Dia 28	C5-11	C5-12	C5-13	C5-21	C5-22	C5-23	C5-31	C5-32	C5-33
t1( $\mu$ s)	31,50			30,70			30,80		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4761,90			4885,99			4870,13		
Média	4839,34								
Desv Padrão	55,14								

Dia 90	C5-11	C5-12	C5-13	C5-21	C5-22	C5-23	C5-31	C5-32	C5-33
t1( $\mu$ s)	29,60			29,50			30,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	5067,57			5084,75			5000,00		
Média	5050,77								
Desv Padrão	36,58								

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

12	F4								
Dia 3	F4-11	F4-12	F4-13	F4-21	F4-22	F4-23	F4-31	F4-32	F4-33
t1( $\mu$ s)	33,00			32,70			33,20		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4545,45			4587,16			4518,07		
Média	4550,23								
Desv Padrão	28,40								

Dia 7	F4-11	F4-12	F4-13	F4-21	F4-22	F4-23	F4-31	F4-32	F4-33
t1( $\mu$ s)	31,10			31,10			31,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4823,15			4823,15			4746,84		
Média	4797,71								
Desv Padrão	35,98								

Dia 14	F4-11	F4-12	F4-13	F4-21	F4-22	F4-23	F4-31	F4-32	F4-33
t1( $\mu$ s)	32,10			32,80			32,50		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4672,90			4573,17			4615,38		
Média	4620,48								
Desv Padrão	40,87								

Dia 21	F4-11	F4-12	F4-13	F4-21	F4-22	F4-23	F4-31	F4-32	F4-33
t1( $\mu$ s)	31,70			31,50			32,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4731,86			4761,90			4687,50		
Média	4727,09								
Desv Padrão	30,56								

Dia 28	F4-11	F4-12	F4-13	F4-21	F4-22	F4-23	F4-31	F4-32	F4-33
t1( $\mu$ s)	31,20			31,00			31,20		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4807,69			4838,71			4807,69		
Média	4818,03								
Desv Padrão	14,62								

Dia 90	F4-11	F4-12	F4-13	F4-21	F4-22	F4-23	F4-31	F4-32	F4-33
t1( $\mu$ s)	30,90			29,70			30,70		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4854,37			5050,51			4885,99		
Média	4930,29								
Desv Padrão	85,98								

13	CC4								
<b>Dia 3</b>	CC4-11	CC4-12	CC4-13	CC4-21	CC4-22	CC4-23	CC4-31	CC4-32	CC4-33
t1( $\mu$ s)	34,10			34,10			33,20		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4398,83			4398,83			4518,07		
Média	4438,58								
Desv Padrão	56,21								

<b>Dia 7</b>	CC4-11	CC4-12	CC4-13	CC4-21	CC4-22	CC4-23	CC4-31	CC4-32	CC4-33
t1( $\mu$ s)	32,40			31,90			32,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4629,63			4702,19			4687,50		
Média	4673,11								
Desv Padrão	31,32								

<b>Dia 14</b>	CC4-11	CC4-12	CC4-13	CC4-21	CC4-22	CC4-23	CC4-31	CC4-32	CC4-33
t1( $\mu$ s)	31,80			31,40			31,70		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4716,98			4777,07			4731,86		
Média	4741,97								
Desv Padrão	25,55								

<b>Dia 21</b>	CC4-11	CC4-12	CC4-13	CC4-21	CC4-22	CC4-23	CC4-31	CC4-32	CC4-33
t1( $\mu$ s)	31,60			31,00			31,50		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4746,84			4838,71			4761,90		
Média	4782,48								
Desv Padrão	40,23								

<b>Dia 28</b>	CC4-11	CC4-12	CC4-13	CC4-21	CC4-22	CC4-23	CC4-31	CC4-32	CC4-33
t1( $\mu$ s)	30,80			30,30			30,50		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4870,13			4950,50			4918,03		
Média	4912,89								
Desv Padrão	33,01								

<b>Dia 90</b>	CC4-11	CC4-12	CC4-13	CC4-21	CC4-22	CC4-23	CC4-31	CC4-32	CC4-33
t1( $\mu$ s)	30,50			30,40			29,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4918,03			4934,21			5067,57		
Média	4973,27								
Desv Padrão	67,00								

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

14	C6								
Dia 3	C6-11	C6-12	C6-13	C6-21	C6-22	C6-23	C6-31	C6-32	C6-33
t1( $\mu$ s)	33,10			34,00			33,30		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4531,72			4411,76			4504,50		
Média	4482,66								
Desv Padrão	51,35								

Dia 7	C6-11	C6-12	C6-13	C6-21	C6-22	C6-23	C6-31	C6-32	C6-33
t1( $\mu$ s)	32,30			31,80			31,60		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4643,96			4716,98			4746,84		
Média	4702,59								
Desv Padrão	43,21								

Dia 14	C6-11	C6-12	C6-13	C6-21	C6-22	C6-23	C6-31	C6-32	C6-33
t1( $\mu$ s)	30,40			30,20			29,20		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4934,21			4966,89			5136,99		
Média	5012,69								
Desv Padrão	88,89								

Dia 21	C6-11	C6-12	C6-13	C6-21	C6-22	C6-23	C6-31	C6-32	C6-33
t1( $\mu$ s)	31,70			31,40			31,20		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4731,86			4777,07			4807,69		
Média	4772,21								
Desv Padrão	31,15								

Dia 28	C6-11	C6-12	C6-13	C6-21	C6-22	C6-23	C6-31	C6-32	C6-33
t1( $\mu$ s)	30,80			30,90			30,90		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4870,13			4854,37			4854,37		
Média	4859,62								
Desv Padrão	7,43								

Dia 90	C6-11	C6-12	C6-13	C6-21	C6-22	C6-23	C6-31	C6-32	C6-33
t1( $\mu$ s)	30,80			31,20			31,00		
Velocidade(mm/ $\mu$ s)	4870,13			4807,69			4838,71		
Média	4838,84								
Desv Padrão	25,49								

D.3 – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos betões: resistência à compressão

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C1	F1	CC1	C2	F2	CC2	C3	F3	C4	CC3	C5	F4	CC4	C6

ISEL - TFM - 35205

Resistência à compressão	NP EN 196-1
	NP EN 12390-3

			Dimensões dos provetes cúbicos		
Fim de rampa	2700	kN	Comp(m)	Área (mm <sup>2</sup> )	Vol(m <sup>3</sup> )
Velocidade	13,2	kN/s	0,15	22500	0,00338

1	C1		
<b>Dia 28</b>	C1-4	C1-5	C1-6
Carga 1 (kN)	895,6	962,0	937,1
Peso(g)	7917,0	7930,0	7850,0
tempo(s)	67,85	72,88	70,99
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	39,80	42,76	41,65
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpr limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	41,40		
Desv Padrão	1,22		
Peso médio(g)	7899,00		
Desv Padrão	35,05		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2340,44		

<b>Dia 90</b>	C1-1	C1-2	C1-3
Carga 1 (kN)	774,4	766,4	900,3
Peso(g)	7929,0	7938,0	7859,0
tempo(s)	58,67	58,06	68,20
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	34,42	34,06	40,01
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpr limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	36,16		
Desv Padrão	2,73		
Peso médio(g)	7908,67		
Desv Padrão	35,31		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2343,31		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

2	F1		
Dia 28	F1-4	F1-5	F1-6
Carga 1 (kN)	1068,7	1064,2	997,8
Peso(g)	7874,0	7856,0	7918,0
tempo(s)	80,96	80,62	75,59
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	47,50	47,30	44,35
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	46,38		
Desv Padrão	1,44		
Peso médio(g)	7882,67		
Desv Padrão	26,04		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2335,60		

Dia 90	F1-1	F1-2	F1-3
Carga 1 (kN)	876,3	905,8	863,7
Peso(g)	7794,0	7864,0	7883,0
tempo(s)	66,39	68,62	65,43
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	38,95	40,26	38,39
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	39,20		
Desv Padrão	0,78		
Peso médio(g)	7847,00		
Desv Padrão	38,27		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2325,04		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

3	CC1		
Dia 28	CC1-4	CC1-5	CC1-6
Carga 1 (kN)	857,5	802,5	835,2
Peso(g)	7746,0	7776,0	7725,0
tempo(s)	64,96	60,80	63,27
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	38,11	35,67	37,12
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	36,97		
Desv Padrão	1,00		
Peso médio(g)	7749,00		
Desv Padrão	20,93		
Massa vol média (kg/m3)	2296,00		

Dia 90	CC1-1	CC1-2	CC1-3
Carga 1 (kN)	754,3	747,7	715,7
Peso(g)	7872,0	7799,0	7877,0
tempo(s)	57,14	56,64	54,22
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	33,52	33,23	31,81
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	32,85		
Desv Padrão	0,75		
Peso médio(g)	7849,33		
Desv Padrão	35,65		
Massa vol média (kg/m3)	2325,73		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

4	C2		
Dia 28	C2-4	C2-5	C2-6
Carga 1 (kN)	996,8	767,7	860,5
Peso(g)	7973,0	7881,0	7856,0
tempo(s)	75,52	58,16	65,19
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	44,30	34,12	38,24
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	38,89		
Desv Padrão	4,18		
Peso médio(g)	7903,33		
Desv Padrão	50,31		
Massa vol média (kg/m3)	2341,73		

Dia 90	C2-1	C2-2	C2-3
Carga 1 (kN)	769,6	1144,6	1083,3
Peso(g)	7815,0	7978,0	7802,0
tempo(s)	58,30	86,71	82,07
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	34,20	50,87	48,15
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	44,41		
Desv Padrão	7,30		
Peso médio(g)	7865,00		
Desv Padrão	80,08		
Massa vol média (kg/m3)	2330,37		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

5	F2		
Dia 28	F2-4	F2-5	F2-6
Carga 1 (kN)	865,1	837,0	836,8
Peso(g)	7956,0	8021,0	7906,0
tempo(s)	65,54	63,41	63,39
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	38,45	37,20	37,19
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	37,61		
Desv Padrão	0,59		
Peso médio(g)	7961,00		
Desv Padrão	47,08		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2358,81		

Dia 90	F2-1	F2-2	F2-3
Carga 1 (kN)	1249,5	1128,5	1150,0
Peso(g)	7980,0	7941,0	7980,0
tempo(s)	94,66	85,49	87,12
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	55,53	50,16	51,11
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	52,27		
Desv Padrão	2,34		
Peso médio(g)	7967,00		
Desv Padrão	18,38		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2360,59		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

6	CC2		
Dia 28	CC2-4	CC2-5	CC2-6
Carga 1 (kN)	784,0	713,1	791,4
Peso(g)	7750,0	7800,0	7961,0
tempo(s)	59,39	54,02	59,95
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	34,84	31,69	35,17
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	33,90		
Desv Padrão	1,57		
Peso médio(g)	7837,00		
Desv Padrão	90,03		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2322,07		

Dia 90	CC2-1	CC2-2	CC2-3
Carga 1 (kN)	1115,3	1088,4	1047,3
Peso(g)	7937,0	7860,0	7832,0
tempo(s)	84,49	82,45	79,34
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	49,57	48,37	46,55
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	48,16		
Desv Padrão	1,24		
Peso médio(g)	7876,33		
Desv Padrão	44,39		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2333,73		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

7	C3		
Dia 28	C3-4	C3-5	C3-6
Carga 1 (kN)	681,1	784,4	678,6
Peso(g)	7774,0	7796,0	7800,0
tempo(s)	51,60	59,42	51,41
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	30,27	34,86	30,16
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	31,76		
Desv Padrão	2,19		
Peso médio(g)	7790,00		
Desv Padrão	11,43		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2308,15		

Dia 90	C3-1	C3-2	C3-3
Carga 1 (kN)	999,9	1040,4	954,5
Peso(g)	7925,0	7884,0	7865,0
tempo(s)	75,75	78,82	72,31
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	44,44	46,24	42,42
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	44,37		
Desv Padrão	1,56		
Peso médio(g)	7891,33		
Desv Padrão	25,04		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2338,17		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

8	F3		
Dia 28	F3-4	F3-5	F3-6
Carga 1 (kN)	797,3	899,8	786,3
Peso(g)	8002,0	7934,0	7960,0
tempo(s)	60,40	68,17	59,57
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	35,44	39,99	34,95
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	36,79		
Desv Padrão	2,27		
Peso médio(g)	7965,33		
Desv Padrão	28,02		
Massa vol média (kg/m3)	2360,10		

Dia 90	F3-1	F3-2	F3-3
Carga 1 (kN)	1100,8	1100,8	1076,0
Peso(g)	8061,0	7979,0	7878,0
tempo(s)	83,39	83,39	81,52
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	48,92	48,92	47,82
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	48,56		
Desv Padrão	0,52		
Peso médio(g)	7972,67		
Desv Padrão	74,84		
Massa vol média (kg/m3)	2362,27		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

9	C4		
Dia 28	C4-4	C4-5	C4-6
Carga 1 (kN)	740,8	753,1	832,2
Peso(g)	7945,0	7904,0	8040,0
tempo(s)	56,12	57,05	63,05
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	32,92	33,47	36,99
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprimento limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	34,46		
Desv Padrão	1,80		
Peso médio(g)	7963,00		
Desv Padrão	56,96		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2359,41		

Dia 90	C4-1	C4-2	C4-3
Carga 1 (kN)	1005,0	1049,1	949,5
Peso(g)	7912,0	7935,0	7864,0
tempo(s)	76,14	79,48	71,93
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	44,67	46,63	42,20
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprimento limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	44,50		
Desv Padrão	1,81		
Peso médio(g)	7903,67		
Desv Padrão	29,58		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2341,83		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

10	CC3		
Dia 28	CC3-4	CC3-5	CC3-6
Carga 1 (kN)	791,5	800,3	663,9
Peso(g)	7949,0	7679,0	7878,0
tempo(s)	59,96	60,63	50,30
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	35,18	35,57	29,51
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	33,42		
Desv Padrão	2,77		
Peso médio(g)	7835,33		
Desv Padrão	114,28		
Massa vol média (kg/m3)	2321,58		

Dia 90	CC3-1	CC3-2	CC3-3
Carga 1 (kN)	1089,6	1021,2	1094,1
Peso(g)	7909,0	7717,0	7844,0
tempo(s)	82,55	77,36	82,89
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	48,43	45,39	48,63
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	47,48		
Desv Padrão	1,48		
Peso médio(g)	7823,33		
Desv Padrão	79,73		
Massa vol média (kg/m3)	2318,02		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

11	C5		
Dia 28	C5-4	C5-5	C5-6
Carga 1 (kN)	748,7	769,0	792,6
Peso(g)	7890,0	7854,0	7808,0
tempo(s)	56,72	58,26	60,05
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	33,28	34,18	35,23
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprimento limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	34,23		
Desv Padrão	0,80		
Peso médio(g)	7850,67		
Desv Padrão	33,56		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2326,12		

Dia 90	C5-1	C5-2	C5-3
Carga 1 (kN)	1073,6	941,2	1004,9
Peso(g)	7830,0	7854,0	7895,0
tempo(s)	81,33	71,30	76,13
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	47,72	41,83	44,66
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprimento limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	44,74		
Desv Padrão	2,40		
Peso médio(g)	7859,67		
Desv Padrão	26,84		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2328,79		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

12	F4		
Dia 28	F4-4	F4-5	F4-6
Carga 1 (kN)	791,0	844,5	864,6
Peso(g)	7903,0	8060,0	8098,0
tempo(s)	59,92	63,98	65,50
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	35,16	37,53	38,43
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	37,04		
Desv Padrão	1,38		
Peso médio(g)	8020,33		
Desv Padrão	84,41		
Massa vol média (kg/m3)	2376,40		

Dia 90	F4-1	F4-2	F4-3
Carga 1 (kN)	1055,3	1108,6	858,3
Peso(g)	7948,0	8077,0	7915,0
tempo(s)	79,95	83,98	65,02
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	46,90	49,27	38,15
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	44,77		
Desv Padrão	4,78		
Peso médio(g)	7980,00		
Desv Padrão	69,90		
Massa vol média (kg/m3)	2364,44		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

13	CC4		
Dia 28	CC4-4	CC4-5	CC4-6
Carga 1 (kN)	823,8	770,9	871,3
Peso(g)	7937,0	7853,0	8056,0
tempo(s)	62,41	58,40	66,01
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	36,61	34,26	38,72
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	36,53		
Desv Padrão	1,82		
Peso médio(g)	7948,67		
Desv Padrão	83,28		
Massa vol média (kg/m3)	2355,16		

Dia 90	CC4-1	CC4-2	CC4-3
Carga 1 (kN)	1038,7	1090,2	1053,5
Peso(g)	7826,0	7903,0	7929,0
tempo(s)	78,69	82,59	79,81
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	46,16	48,45	46,82
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumpre limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	47,15		
Desv Padrão	0,96		
Peso médio(g)	7886,00		
Desv Padrão	43,73		
Massa vol média (kg/m3)	2336,59		

APLICAÇÃO DO PLANO FATORIAL PARA O ESTUDO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

14	C6		
Dia 28	C6-4	C6-5	C6-6
Carga 1 (kN)	969,5	812,1	709,6
Peso(g)	8098,0	7927,0	7880,0
tempo(s)	73,45	61,52	53,76
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	43,09	36,09	31,54
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rf média (MPa)	36,91		
Desv Padrão	4,75		
Peso médio(g)	7968,33		
Desv Padrão	93,67		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2360,99		

Dia 90	C6-1	C6-2	C6-3
Carga 1 (kN)	891,0	1054,1	1039,3
Peso(g)	8037,0	8038,0	8037,0
tempo(s)	67,50	79,86	78,73
Velocidade 1 (kN/s)	13,20	13,20	13,20
Rc (MPa)	39,60	46,85	46,19
Velocidade 2(MPa/s)	0,59	0,59	0,59
Cumprir limite 0,6 ± 0,2 (MPa/s)	sim	sim	sim
Rc média (MPa)	44,21		
Desv Padrão	3,27		
Peso médio(g)	8037,33		
Desv Padrão	0,47		
Massa vol média (kg/m <sup>3</sup> )	2381,43		