

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Gonçalo Alexandre Ferreira Duarte

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DOE EM ARGAMASSAS
BASEADAS NO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE
TRANSFORMAÇÃO DE PEDRA**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções, orientada pelo Professor Doutor Fernando José Forte Garrido Branco e pelo Professor Doutor António Alberto Santos Correia, apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2023

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Gonçalo Alexandre Ferreira Duarte

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DOE EM ARGAMASSAS BASEADAS NO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE TRANSFORMAÇÃO DE PEDRA

APPLICATION OF DOE METHODOLOGY IN MORTARS BASED ON THE USE OF STONE PROCESSING WASTE

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Fernando José Forte Garrido Branco e pelo Professor Doutor António Alberto Santos Correia

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Setembro de 2023

1 2  9 0

UNIVERSIDADE D
COIMBRA

“Um homem é do tamanho do seu sonho”.

Fernando Pessoa

À minha família, namorada e amigos

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha imensa gratidão a todas as pessoas que desempenharam um papel fundamental na realização de uma das etapas mais importantes e desafiantes da minha vida.

Este trabalho foi parcialmente financiado no âmbito do projeto DUST+ - Compósitos inovadores com incorporação de pó resultante das lamas do corte de pedra calcária, com a referência POCI-01-0247-FEDER-47076.

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Fernando Branco e Professor Doutor António Correia, por todo o apoio, colaboração e disponibilidade demonstrada ao longo destes meses de trabalho.

Ao Luís Pereira, expresso o meu profundo agradecimento, pela ajuda e total disponibilidade durante a realização dos ensaios realizados.

Ao Sr. José António, técnico do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, pela constante disponibilidade e assistência em diversos procedimentos e ensaios laboratoriais.

Gostaria também de agradecer a todos os meus colegas de doutoramento na Especialização de Geotecnia, por toda a amizade, carinho e simpatia demonstrados.

Aos meus amigos e colegas de curso, em particular ao Francisco Rebanda, ao Gonçalo Carvalho, ao Henrique Silva e ao João Carmo, pela amizade e companheirismo, quer nos momentos de estudo, quer nos momentos de lazer e diversão.

À minha namorada, Bárbara, pelo apoio incondicional, amizade e tolerância, bem como toda a paciência dentro e fora do contexto académico.

O agradecimento mais profundo vai para a minha família, especialmente para os meus pais Sofia e Hélder, por me terem proporcionado a oportunidade de ter um futuro melhor e pelo apoio em todas as etapas da minha vida, acreditando sempre no meu valor. Também gostaria

de agradecer ao meu irmão, Diogo, à minha avó, Susete e à minha tia, Lucinda, pela força e motivação que sempre demonstram para comigo desde cedo.

O meu sincero e enorme obrigado a todos!

RESUMO

A indústria das rochas ornamentais representa uma parcela significativa das exportações em Portugal. A produção de resíduos constitui um dos principais constrangimentos desta indústria, em ambas as suas componentes (extrativa e transformadora). As pedreiras de rocha ornamental apresentam uma baixa taxa de aproveitamento, sendo responsáveis pela acumulação de grandes aterros de resíduos.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de misturas de argamassas contendo resíduo proveniente do corte de pedra calcária, face a agressões ambientais. Utilizaram-se diversos ligantes nas composições dessas argamassas, com o objetivo de substituir parcialmente esses ligantes por resíduo em diferentes proporções. Desta vez promove-se reaproveitamento dos resíduos gerados na extração e no corte das rochas, no sentido de reduzir o volume de resíduos através da sua incorporação em materiais de maior valor acrescentado.

Na definição dos ensaios a realizar em laboratório, utilizou-se a metodologia Design of Experiments (DOE) com auxílio de um *software* específico, mais concretamente o *JMP Pro 2017*. Esta metodologia tem como objetivo reduzir o esforço laboratorial na preparação de misturas de argamassas, sem comprometer a precisão e robustez dos resultados. Tendo por base diversos parâmetros que definem as misturas de argamassas, bem como os seus níveis (esforço de dados), foi possível desenvolver modelos preditivos para diversas respostas (resistência mecânica à compressão, à flexão, à tração por compressão diametral, velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e penetração de cloretos).

Com base nos resultados obtidos, chegou-se à conclusão que a substituição parcial de resíduos de corte de pedra (RCP) por ligante, com uma taxa de 5 a 10%, e a utilização de traços compreendidos entre 1:2.5 e 1:3, contribuíram para que algumas das argamassas apresentassem desempenhos positivos nos ensaios realizados, mostrando-se muito similares às argamassas de referência.

Palavras-chave: argamassa; resíduo industrial; resíduo de pedreira; DOE

ABSTRACT

The ornamental rock industry represents a significant portion of exports in Portugal. The production of waste constitutes one of the main constraints of this industry, in both its extractive and transformative components. Ornamental rock quarries have a low utilization rate, leading to the accumulation of large waste landfills.

The present work aims to evaluate the performance of mortar mixtures containing waste from limestone cutting in the face of environmental aggressions. Various binders were used in the compositions of these mortars, with the objective of partially replacing these binders with waste in different proportions. This time, the reuse of waste generated in the extraction and cutting of rocks is promoted in order to reduce the volume of waste by incorporating it into higher value-added materials.

In defining the laboratory tests to be carried out, the Design of Experiments (DOE) methodology was used with the assistance of specific software, specifically JMP Pro 2017. This methodology aims to reduce the labor effort in the preparation of mortar mixtures without compromising the precision and robustness of the results. Based on various parameters that define the mortar mixtures, as well as their levels (data effort), it was possible to develop predictive models for various responses (mechanical compressive strength, flexural strength, compressive diametral tensile strength, ultrasonic wave propagation velocity, and chloride penetration).

Based on the results obtained, it was concluded that the partial replacement of stone cutting waste (RCP) with a binder, at a rate of 5 to 10%, and the use of mix ratios between 1:2.5 and 1:3, contributed to some of the mortars exhibiting positive performance in the conducted tests, appearing very similar to reference mortars.

Key words: mortar; industrial waste; quarry waste; DOE

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABELAS	xi
SIMBOLOGIA	xii
ABREVIATURAS	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento e motivação.....	1
1.2. Objetivos gerais e específicos	1
1.3. Organização do documento	2
2. ESTADO DA ARTE	4
2.1. Utilização de resíduos em argamassas.....	4
2.2. Desempenho de argamassas com baixo teor de cimento.....	6
2.3. Agressões ambientais.....	9
2.4. Metodologia DOE (Design of experiments).....	10
3. TRABALHO LABORATORIAL	12
3.1. Materiais e métodos	12
3.1.1. Materiais utilizados	15
3.1.2. Produção das misturas e dos provetes de ensaio	17
3.1.3. Métodos de ensaio realizados	20
3.2. Ensaio de caracterização do agregado utilizado nas argamassas	21
3.2.1. Análise granulométrica.....	21
3.2.2. Massa volúmica	23
3.2.3. Baridade.....	24
3.3. Avaliação de desempenho	25
3.3.1. Desempenho Mecânico: resistência à flexão, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral	26
3.3.2. Durabilidade: velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (PUNDIT) e penetração de cloretos	30
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	35

4.1.	Caracterização do agregado utilizado nas argamassas.....	35
4.1.1.	Análise granulométrica.....	35
4.1.2.	Massa volúmica	36
4.1.3.	Baridade.....	36
4.2.	Caracterização das argamassas realizadas no estado endurecido	36
4.2.1.	Ensaio de determinação da resistência à flexão.....	38
4.2.2.	Ensaio de determinação da resistência à compressão.....	42
4.2.3.	Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral	45
4.2.4.	Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (PUNDIT).....	48
4.2.5.	Ensaio de penetração de cloretos.....	53
5.	PREVISÃO DOS RESULTADOS UTILIZANDO A METODOLOGIA DOE	57
5.1.	Considerações iniciais.....	57
5.2.	Análise do modelo gerado para o ensaio à compressão aos 7 e 28 dias de cura	57
5.3.	Análise dos modelos de previsão gerados para os ensaios mecânicos e de durabilidade aos 7 e 28 dias de cura	63
5.3.1.	Ensaios mecânicos.....	63
5.3.2.	Ensaios de durabilidade	67
5.4.	Misturas de validação	72
6.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	77
6.1.	Conclusões	77
6.2.	Desenvolvimentos futuros	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
	ANEXO A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA.....	84
	ANEXO B – FICHAS TÉCNICAS DOS LIGANTES	85
	B. 1 Ficha técnica do cimento	85
	B. 2 Ficha técnica do resíduo de corte de pedra de calcário (RCP)	86
	B. 3 Ficha técnica das escórias	87
	B. 4 Ficha técnica da cal hidráulica.....	88
	B. 5 Ficha técnica da cal hidratada	89
	B. 6 Ficha técnica do superplastificante	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - a) Procedimento do corte de pedra natural; b) Transporte dos blocos de pedra	4
Figura 2.2 - Formação de lamas após o processo de extração e transformação de pedra natural	6
Figura 2.3 - Descarga de resíduo proveniente do corte de pedra natural	10
Figura 2.4 - Esquema da metodologia DOE	11
Figura 3.1 - Domínio gráfico do modelo	13
Figura 3.2 - Materiais utilizados na confecção das argamassas: a) Areia, b) Cimento; c) Pó de pedra; d) Escórias; e) Cal hidráulica; f) Cal hidratada; g) Superplastificante; h) Alguns dos provetes confeccionados com os diversos materiais utilizados	16
Figura 3.3 - a) Misturadora utilizada; b) Pesagem do agregado e ligante(s) de cada uma das amassaduras	17
Figura 3.4 - a) Utilização da espátula metálica para retirar os excessos de argamassa nas paredes do recipiente; b) Conclusão da amassadura	18
Figura 3.5 - a) Moldes prismáticos utilizados; b) Moldagem dos provetes prismáticos	18
Figura 3.6 - a) Moldes cilíndricos utilizados; b) Moldagem dos provetes cilíndricos; c) Aspetto final dos provetes após a sua desmoldagem	19
Figura 3.7 - Introdução dos provetes na câmara húmida	20
Figura 3.8 - a) Amostra utilizada; b) Peneiros utilizados na análise granulométrica do agregado	22
Figura 3.9 - a) Pesagem do picnómetro com agregado; b) Enchimento do picnómetro com água até à superfície do mesmo	24
Figura 3.10 - a) Balança utilizada; b) Pesagem do recipiente com o agregado devidamente nivelado	25
Figura 3.11 - a) Aparelho utilizado no ensaio de resistência à flexão; b) Realização do ensaio de resistência à flexão; c) Rotura de um dos provetes na realização do ensaio de resistência à flexão	27
Figura 3.12 - a) Aparelho utilizado no ensaio de resistência à compressão; b) Realização do ensaio de resistência à compressão; c) Rotura de um dos provetes na realização do ensaio de resistência à compressão	28

Figura 3.13 - a) Aparelho utilizado no ensaio de resistência à tração por compressão diametral; b) Realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral; c) Rotura de um dos provetes na realização do ensaio de resistência à tração por compressão dia	29
Figura 3.14 - a) Aparelho utilizado no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas; b) Massa de contacto utilizada; c) realização do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas	31
Figura 3.15 - a) Tina de água onde permaneceram todos os provetes antes da realização de cada ensaio;	33
Figura 3.16 - a) Fonte utilizada e os respetivos cabos que farão a ligação; b) Pulverização das metades dos provetes com a solução de nitrato de prata; c) Medição da penetração de cloretos através de um paquímetro digital	34
Figura 4.1 - Curva granulométrica do agregado	36
Figura 4.2 - Resistência mecânica à flexão aos 7, 17.5 e 28 dias de cura	38
Figura 4.3 - Comparação dos ganhos de resistência nos ensaios à flexão entre os 7 e os 28 dias de cura	40
Figura 4.4 - Resistência mecânica à compressão aos 7, 17.5 e 28 dias de cura	42
Figura 4.5 - Comparação dos ganhos de resistência nos ensaios à compressão entre os 7 e os 28 dias de cura	43
Figura 4.6 - Resistência mecânica à tração por compressão diametral aos 7, 17.5 e 28 dias de cura	45
Figura 4.7 - Comparação dos ganhos de resistência nos ensaios à compressão diametral entre os 7 e os 28 dias de cura	46
Figura 4.8 - Velocidades médias de propagação de ondas ultrassónicas para as diversas misturas (28 dias de cura)	49
Figura 4.9 - Comparação das velocidades de propagação de ondas ultrassónicas médias obtidas para misturas com traço 1:2.5	51
Figura 4.10 - Comparação das velocidades médias de propagação de ondas ultrassónicas obtidas para misturas com traço 1:3.75	51
Figura 4.11 - Comparação das velocidades médias de propagação de ondas ultrassónicas obtidas para misturas com traço 1:5	52
Figura 4.12 - a) Possível reação da solução de hidróxido de sódio (NaOH) com as misturas de escórias e cal hidráulica; b) Inexistência da marca de penetração dos cloretos nos provetes das misturas com ligante de cal hidráulica (provetes à esquerda) e escórias (provetes à direita)	53

Figura 4.13 - Coeficiente de migração de cloretos (m^2/s)	55
Figura 5.1 - Modelo de previsão para a resistência à compressão aos 7 dias de cura	58
Figura 5.2 - a) Resumo dos efeitos considerados nos modelos de previsão das resistências mecânicas aos 7 dias de cura; b) Informações relativas ao modelo gerado para os 7 dias de cura para o ensaio à compressão	58
Figura 5.3 - Análise da variância (ANOVA) do modelo gerado para os 7 dias de cura	59
Figura 5.4 - Expressão que traduz a previsão da resistência à compressão aos 7 dias de cura	60
Figura 5.5 - Previsão dos resultados para a resistência à compressão aos 28 dias de cura	61
Figura 5.6 - a) Resumo dos efeitos considerados nos modelos de previsão das resistências mecânicas aos 28 dias de cura; b) Informações relativas à reta obtida para o modelo de previsão aos 28 dias de cura para o ensaio à compressão	61
Figura 5.7 - Análise da variância (ANOVA) do modelo gerado para os 28 dias de cura	62
Figura 5.8 - Expressão que traduz a previsão da resistência à compressão aos 28 dias de cura	62
Figura 5.9 - Informações relativas à reta obtida para o modelo de previsão gerado para os 7 dias de cura consoante o tipo de ensaio: a) Ensaio à flexão; b) Ensaio à compressão diametral	63
Figura 5.10 - Previsão das respectivas resistências mecânicas (f_c , f_f e f_t) aos 7 dias de cura para os diferentes níveis de substituição de RCP e traços consoante o tipo de ligante: a) Cimento (C); b) Cal hidráulica (CH); Escórias (E); d) Cimento + Cal hidráulica (C+CH)	64
Figura 5.11 - Informações relativas à reta obtida para o modelo de previsão gerado para os 28 dias de cura consoante o tipo de ensaio: a) Ensaio à flexão; b) Ensaio à compressão diametral	66
Figura 5.12 - Previsão das respectivas resistências mecânicas (f_c , f_f e f_t) aos 28 dias de cura para os diferentes níveis de substituição de RCP e traços consoante o tipo de ligante: a) Cimento (C); b) Cal hidráulica (CH); Escórias (E); d) Cimento + Cal hidráulica (C+CH)	67
Figura 5.13 - Resumo dos efeitos considerados no modelo de previsão da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas aos 28 dias de cura	68
Figura 5.14 - Informações relativas à reta obtida para o modelo de previsão aos 28 dias de cura para o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas	68
Figura 5.15 - Previsão da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas aos 28 dias de cura para os diferentes níveis de substituição de RCP e traços consoante o tipo de	

ligante: a) Cimento (C); b) Cal hidráulica (CH); Escórias (E); d) Cimento + Cal hidráulica (C+CH)	69
Figura 5.16 - Resumo da influência dos efeitos considerados no modelo de previsão do coeficiente de migração de cloretos aos 28 dias de cura	70
Figura 5.17 - Informações relativas à reta obtida para o modelo de precisão aos 28 dias de cura para o ensaio de penetração de cloretos	71
Figura 5.18 - Previsão do coeficiente de migração de cloretos aos 28 dias para os diferentes níveis de substituição de RCP e traços consoante o tipo de ligante: a) Cimento (C); b) Cimento + Cal Hidráulica (C+CH)	71
Figura 5.19 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para o ensaio de resistência à compressão para as misturas de validação consoante a idade de cura: a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura	73
Figura 5.20 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para o ensaio de resistência à flexão para as misturas de validação consoante a idade de cura: a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura	74
Figura 5.21 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas de validação consoante a idade de cura: a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura	74
Figura 5.22 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas para os 28 dias de cura	75
Figura 5.23 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para ensaio de penetração de cloretos para os 28 dias de cura	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composições estudadas	14
Tabela 3.2 - Materiais utilizados na confecção das argamassas	15
Tabela 3.3 - Determinação do potencial a aplicar e a duração do ensaio, a partir da corrente inicial de 30V (E-463, 2004)	34
Tabela 4.1 - Resistência mecânica à flexão, à compressão e à tração por compressão diametral aos 7, 17.5 e 28 dias de cura (MPa)	37
Tabela 4.2 - Variação da resistência à flexão (%) das diversas misturas comparativamente com a mistura REF-1 para os 7 e 28 dias	41
Tabela 4.3 - Variação da resistência à compressão (%) das diversas misturas comparativamente com a mistura REF-1 para os 7 e 28 dias	44
Tabela 4.4 - Variação da resistência à compressão diametral (%) das diversas misturas comparativamente com a mistura REF-1 para os 7 e 28 dias	47
Tabela 4.5 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas (m/s)	48
Tabela 4.6 - Valor médio da profundidade de penetração (m) e os respectivos coeficientes de migração de cloretos (m^2/s)	54
Tabela 4.7 - Porosidade média para as misturas REF-1, M4 e M5	55

SIMBOLOGIA

A – Área da zona comprimida de cada um dos provetes prismáticos

Ag₂NO₃ – Nitrato de prata

b – Largura da chapa metálica do acessório

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

d – Diâmetro do provete cilíndrico

d₁ e d₂ – Dimensões das arestas do topo do provete prismático

d₂₀^t – Massa volúmica

D_{nssm} – Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário

F – Carga aplicada que provoca a rotura à compressão diametral

f_c – Tensão de rotura à compressão

F_c – Carga aplicada que provoca a rotura à compressão

f_f – Tensão de rotura à flexão

F_f – Carga aplicada a meio-vão que provoca a rotura à flexão

f_{t,D} – Tensão de rotura por compressão diametral

L – Distância entre os apoios cilíndricos

L – Altura do provete cilíndrico

L – Espessura dos provetes (discos)

m₁ – Massa do picnómetro cheio de água

m₁ – Massa do recipiente vazio

m₂ – Massa do provete seco

m₂ – Massa do recipiente com o agregado

m₃ – Massa do picnómetro com o provete e água

m_h – Massa húmida do agregado

m_s – Massa seca do agregado

NaCl – Cloreto de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

P – Porosidade do agregado

P_b – Baridade do agregado

P_{cl} – Penetração de cloretos

T – Valor médio das temperaturas inicial e final na solução de cloreto de sódio

t – Duração do ensaio de penetração de cloretos

U – Valor absoluto da tensão aplicada

V – Volume do recipiente

v_p – Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas

x_d – Valor médio das profundidades de penetração de cloreto

ABREVIATURAS

ASR - Alkali-sílica reaction

C – Cimento

CH – Cal hidráulica

DOE – Design of Experiments

E – Escórias

RCP – Resíduo de corte de pedra natural

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação

A indústria de extração e transformação da pedra natural é globalmente difundida, devido ao seu papel crucial na construção civil e no desenvolvimento do mesmo. Esta atividade acaba por ser muito influente devido ao seu grande impacto económico e ambiental em todo o planeta. Embora seja um recurso geológico indispensável para o desenvolvimento de um país, a sua rentabilidade está diretamente relacionada com a capacidade e disponibilidade deste recurso (INETI, 2001).

O desenvolvimento sustentável deve atender todas as necessidades das gerações do presente, sem que haja o comprometimento das necessidades de gerações futuras. Hoje é bastante clara a interdependência entre os conceitos de meio ambiente. Valorização de resíduos, saneamento e saúde, porém as ações nestes setores devem ser integradas e voltadas para melhoria da qualidade de vida da sociedade (Santos, 2008).

Num momento em que a sustentabilidade é uma prioridade crescente no setor da construção, há um interesse em explorar soluções construtivas que permitam a utilização de materiais reciclados, nomeadamente o resíduo de corte de pedra natural (RCP). Neste contexto, surge a hipótese de incorporar o RCP em argamassas como substituto parcial do ligante, com o objetivo de manter ou até melhorar o desempenho das argamassas utilizadas. Melhorias essas, relacionadas com a trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade. No entanto, é importante avaliar a influência do RCP nas propriedades das argamassas e otimizar as dosagens de cada um dos elementos constituintes (agregado(s), ligante(s) e água) com o objetivo de chegar à melhor solução garantindo assim a compatibilidade e estabilidade destes materiais.

1.2. Objetivos gerais e específicos

Esta dissertação tem como objetivo principal a investigação sobre o impacto da incorporação de RCP como substituto parcial dos ligantes em argamassas, utilizando como ligantes o cimento Portland I 42,5 R (CEM I 42,5 R), escórias de origem turca (E) e cal hidráulica (CH). O estudo será realizado com foco nas propriedades mecânicas, incluindo a resistência à compressão,

flexão e compressão diametral, bem como noutras propriedades, como a resistência, à penetração de cloretos e a velocidade de propagação de ondas e condutividade elétrica.

Para realizar este estudo, será utilizada a metodologia DOE (Design of Experiments), que visa maximizar a eficiência (minimizar o consumo de recursos – tempo e materiais) para obter uma estimativa otimizada dos parâmetros que controlam o comportamento das argamassas, nomeadamente o tipo de ligante utilizado, o traço das argamassas e a percentagem de substituição de RCP. Esta metodologia tem a capacidade de analisar de forma mais completa e precisa todos os resultados obtidos, identificando quais são os parâmetros com mais influência nas propriedades das argamassas. Por outro lado, o DOE permite racionalizar e rentabilizar os ensaios necessários, reduzindo o investimento laboratorial ao mínimo necessário para a obtenção de resultados estatisticamente significativos.

A utilização de RCP como substituto parcial do ligante em argamassas tem a potencialidade de melhorar a sustentabilidade no setor da construção, reduzir a quantidade de resíduos gerados e diminuir a dependência de materiais não renováveis.

Deste modo, este estudo contribuirá para compreender de forma mais aprofundada, o impacto da utilização de RCP nas propriedades das argamassas, bem como para o desenvolvimento de novas soluções construtivas mais eficientes e sustentáveis.

1.3. Organização do documento

A presente dissertação é composta por seis capítulos, complementados por referências bibliográficas e um de anexos, cujos conteúdos são descritos abaixo.

O capítulo 1, está dividido em três secções, tendo sido realizada uma introdução ao tema abordado, um breve enquadramento e motivação. Na segunda secção são delineados os objetivos gerais e específicos da pesquisa em questão. Por fim, é apresentada a estrutura da dissertação, indicando como os diversos capítulos são organizados e abordados ao longo da dissertação.

O capítulo 2, está dividido em quatro secções, nos quais é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema em análise. A primeira secção consiste numa introdução geral sobre a utilização de RCP em argamassas. Em seguida, é realizada uma abordagem geral sobre o desempenho de argamassas com baixo teor de cimento. A terceira secção refere as principais agressões ambientais causadas pela acumulação de RCP e apresenta uma descrição dos principais métodos de ensaios para argamassas. Por fim, apresenta-se e descreve-se a metodologia DOE utilizada.

O capítulo 3 consiste numa descrição detalhada das atividades laboratoriais realizadas, e encontra-se dividido em duas secções. A primeira secção aborda os materiais utilizados na pesquisa e as diferentes misturas que foram produzidas, incluindo as misturas de referência e as misturas com adição de RCP, juntamente com os respetivos procedimentos e cuidados a ter em consideração. Na segunda secção, é realizada uma avaliação do desempenho das misturas produzidas, considerando todos os ensaios realizados com o objetivo de estudar o respetivo comportamento mecânico e de resistência.

O capítulo 4 da presente dissertação está dividido em três secções, nos quais são apresentados e discutidos de forma detalhada todos os resultados obtidos a partir dos ensaios abordados no capítulo anterior. A primeira secção tem como objetivo fornecer um contexto e uma visão geral sobre o que será discutido no presente capítulo. Na secção seguinte é realizada uma análise detalhada das características do agregado utilizado nas argamassas desenvolvidas, especificamente por meio de uma análise granulométrica e da determinação da sua massa volúmica aparente (baridade). Por último são apresentados e analisados todos os resultados obtidos para cada um dos ensaios realizados.

No capítulo 5 realiza-se uma previsão dos resultados obtidos no capítulo anterior, com base na metodologia DOE, sendo composto por 3 secções. A primeira secção tem como finalidade dar a conhecer o que será abordado nas secções seguintes. Na segunda secção, é realizada inicialmente uma análise mais detalhada ao modelo de previsão gerado pelo software utilizado para o ensaio de resistência à compressão. Na terceira secção, são apresentados e discutidos, de forma generalizada, os modelos de previsão gerados para cada um dos ensaios realizados.

No capítulo 6, apresentam-se as conclusões retiradas da elaboração do trabalho desenvolvido para a presente dissertação e são propostos novos trabalhos para desenvolvimento futuro.

Por último são identificadas todas as referências bibliográficas que serviram de apoio ao desenvolvimento da presente dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Utilização de resíduos em argamassas

O planeta Terra é constituído por vários recursos geológicos, entre os quais se pode encontrar a pedra natural. A indústria de extração e transformação da pedra natural (Figura 2.1-a)) está associada à produção de elevadas quantidades de resíduos, os quais na sua grande maioria não têm qualquer tipo de aproveitamento. Assim, pode-se afirmar que este tipo de resíduo acaba por ser um recurso disponível em abundância, que por sua vez é relativamente acessível e fácil de transportar na maior parte dos casos, dependendo dos equipamentos e tecnologias disponíveis (Figura 2.1-b)). Estes resíduos podem ser valorizados no processamento de novos produtos para fins comerciais, visto que terão como objetivo assegurar sempre as melhores condições para a sociedade (Machado, 2012).

O reaproveitamento dos resíduos de transformação de pedra não é um procedimento novo e tem sido cada vez mais popular no ramo da construção civil a nível mundial, uma vez que é o ramo da atividade tecnológica que mais interesse tem demonstrado no seu consumo (Chouhan et al, 2020).



Figura 2.1 – a) Procedimento do corte de pedra natural (Fonte: <https://outraspalavras.net/outrasmidias/o-sangue-extraido-das-pedreiras-do-espírito-santo/>); b) Transporte dos blocos de pedra (Fonte: <http://www.solancis.com/pt/pedreiras/extracao>)

Em Portugal, é possível observar uma grande diversidade de explorações e aplicações da pedra natural devido à grande variedade de formações geológicas existentes. Apesar de haver uma vasta experiência no que diz respeito à exploração dos recursos geológicos, mais concretamente da pedra natural, ainda não são conhecidas muitas soluções para a sua reutilização (N, 2010) e/ou valorização dos seus resíduos. Tal acontecimento pode ser explicado devido à dificuldade em encontrar investimentos apropriados, bem como a tecnologia ideal para este tipo de exploração (Machado, 2012).

A adição mineral em substituição parcial do cimento ou agregados de uma determinada argamassa não é um processo recente, mas tem sido cada vez mais alvo de estudos, devido não só a questões ambientais causados pela produção de toneladas de resíduos minerais, mas também relativamente a questões relacionadas com as propriedades químicas e mecânicas das argamassas resultantes (Garcia et al, 2006).

Estudos realizados com este pó (resíduo de corte de pedra natural) como substituto parcial do agregado ou do ligante de uma determinada argamassa, concluíram que não existem riscos ambientais e que a valorização destes resíduos contribui para a construção de uma indústria mais sustentável. Observou-se também que esta adição, promove melhorias ao nível das propriedades mecânicas do material, nomeadamente a resistência à compressão e à flexão, comparativamente a argamassas sem qualquer adição (Moura et al, 2002).

Os resíduos provenientes da extração de pedra natural encontram-se principalmente na forma de pó, sendo igualmente frequente encontrar-se na forma de lamas, ilustrado na Figura 2.2. A produção de lamas é significativa e comum na extração de pedra ornamental, mais concretamente nas operações de desmonte com fio diamantado e de beneficiação do bloco. Tal ocorrência deve-se à utilização de serras de corte, que por sua vez fazem uso de água para os mesmos processos (Machado, 2012).

A água presente nos processos de extração e corte é, posteriormente, separada e tratada, sobrando um pó fino com elevado teor de humidade que, na maioria dos casos, não é objeto de qualquer valorização, acabando por ficar retida/depositada nos próprios aterros das pedreiras onde a extração decorreu (INETI, 2001).

Um bom exemplo da reutilização/valorização das lamas do corte de pedra, é o Brasil onde foi desenvolvido um projeto que propõe a reciclagem de lamas para incorporação em argamassas. Os resultados experimentais, permitiram concluir que o material obtido após essa reutilização, possuía melhores características que o material fabricado convencionalmente (Carvalho et al, 2003).



Figura 2.2 – Formação de lamas após o processo de extração e transformação de pedra natural (Fonte: Machado, 2012)

2.2. Desempenho de argamassas com baixo teor de cimento

As argamassas são dos materiais mais importantes no ramo da construção, tendo uma utilização cada vez maior e mais especializada. A argamassa corresponde a uma mistura homogénea constituída essencialmente por agregado(s) miúdo(s) e/ou graúdo(s), ligante(s) inorgânico(s) e água, podendo conter ou não aditivos, com diversas propriedades de aderência e endurecimento (Santos, 2008).

É possível a obtenção de argamassas com características diferentes que, por sua vez, serão adaptadas para determinadas finalidades. Como tal, variam dependentemente do tipo de função a desempenhar, mas por outro lado do tipo de edifício a servir, sendo necessário considerar as características dos materiais nele presentes bem como a idade do suporte.

Segundo (Santos, 2008), as argamassas divergem em:

- **Argamassa para assentamento**

A argamassa utilizada para o assentamento de alvenaria tem como função promover a união entre os elementos de construção, independentemente da tipologia dos mesmos, seja esta composta por tijolos ou blocos, e podem ser utilizados tanto para fins de selagem quanto para fins estruturais.

- **Argamassa para revestimento**

A argamassa de revestimento é um material utilizado com a finalidade de criar uma camada de regularização, também conhecida como emboço, em superfícies de construção, tanto para ambientes internos quanto externos. Em espaços interiores, a argamassa é utilizada principalmente para revestir paredes ou tetos, proporcionando um acabamento estético

adequado e uniforme. Já em ambientes externos, essa argamassa é indicada para o revestimento de fachadas, muros e outros elementos que estão expostos às condições ambientais.

- **Argamassa para uso geral**

A argamassa para uso geral é um tipo de argamassa que pode ser utilizada em diversas situações de construção, sem exigências técnicas específicas. Esta argamassa possui uma composição mais simples, geralmente contém cimento, cal e areia, e é indicada para aplicação em áreas de menor exigência, ou seja, em situações em que a qualidade da argamassa não é crítica para a estabilidade ou segurança da construção.

- **Argamassa para reboco**

A argamassa de reboco é um tipo de argamassa utilizada na etapa final de acabamento de uma construção, após a aplicação da camada de regularização (ou emboço). A sua principal finalidade consiste em cobrir essa camada de regularização e em seguida preparar a superfície para receber a camada de acabamento, que pode ser uma pintura, textura, revestimento cerâmico, entre outros.

- **Argamassa decorativa**

A argamassa decorativa é um tipo de argamassa utilizado com o propósito de acabamento decorativo em edifícios. Essa argamassa é aplicada em superfícies exteriores, como fachadas, muros, elementos estruturais entre outros, com o objetivo de conferir um aspecto estético diferente à construção.

Como já foi referido, um dos principais componentes no desenvolvimento de uma determinada argamassa é o respetivo ligante. Este pode divergir entre diversos materiais, embora o cimento seja o ligante mais utilizado neste tipo de indústrias.

As indústrias de cimento contribuem a nível global com um volume de 7% do total das emissões de CO₂. Tal fenómeno pode ser explicado devido à calcinação das matérias-primas para a produção deste ligante bem como a respetiva queima de combustíveis necessários para acondicionar temperaturas elevadas nos fornos. Uma das principais soluções que se têm vindo a adotar para colmatar este problema tem sido a utilização de argamassas com baixo teor de cimento, concretizado pela substituição parcial deste por resíduos de transformação de pedra, reduzindo assim a relação clínquer/cimento (Ramos et al, 2013).

Um estudo desenvolvido, centrado na utilização de pó de pedra em substituição ao tradicional cimento Portland (Altheeb, 2022), concluiu que essa substituição é benéfica no que diz respeito à trabalhabilidade da argamassa, devido à natureza esférica das suas partículas que por sua vez

facilita o efeito de rolamento e, conseqüentemente prolonga o tempo de presa devido à sua característica calcária-siliciosa. Verificou-se que, ao aumentar o teor de pó da pedra, reduzia a resistência à compressão devido à redução do teor de cimento. Essa resistência diminuiu à medida que a quantidade de substituição de pó de pedra aumenta de 3% para 15%, sendo que essa diferença de resistência foi superior numa idade de cura precoce enquanto, à medida que o tempo de cura aumentou, a diferença relativa tornou-se menor. Constatou-se também que, para uma dosagem de 20% de pó de pedra triturada foi considerada ótima para aumentar a resistência à compressão, flexão e tração. Em contrapartida, caso essa adição seja superior a 20% apresentará uma tendência negativa. Como o gel de cimento é mais fino do que o de pó de pedra, a percentagem de retração por secagem diminui com o aumento da substituição de pó de pedra. Isto deve-se ao facto de que, quanto mais fino for o gel, maior será a perda de água deste. Constatou-se também que o coeficiente de permeabilidade do betão convencional é menor do que a do betão com adição de pó de pedra, uma vez que as partículas do cimento Portland são mais finas (Altheeb, 2022).

Um programa experimental realizado, focou-se na caracterização do pó de granito obtido a partir de resíduos de lamas graníticas secas e moídas provenientes de uma pedreira no norte de Portugal, com o objetivo da substituição parcial do cimento de uma determinada argamassa. Este estudo mostrou que o resíduo de lodo granítico, caso fosse moído até uma finura suficiente e utilizado até uma quantidade de 10% como substituto ao cimento na argamassa, não compromete a trabalhabilidade ou as propriedades mecânicas e aumenta muito a durabilidade em termos de resistência ao ASR e à penetração de cloretos (Ramos et al, 2013).

Outro estudo desenvolvido (Wang et al, 2018), neste caso relativamente à incorporação do pó de calcário como substituto de cimento ou de agregado miúdo, permitiu concluir que a trabalhabilidade da argamassa com adição de pó de calcário depende do tamanho das partículas, do teor e das impurezas neste agregado. Verificou-se que, quando adicionada uma pequena quantidade de finos de pó de calcário para substituir o cimento ou quando substituída por agregados miúdos o tempo de presa diminuiu. Em contrapartida, a incorporação de pó de calcário grosso ou em grande quantidade de finos para substituir o cimento originou num aumento de tempo de presa na argamassa. Quanto à resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à flexão do betão com incorporação de pó de calcário ou com a substituição dos agregados miúdos, em geral, as propriedades mecânicas da argamassa aumentaram. Caso haja uma substituição do cimento por agregados de pó de calcário grosso ou por uma grande quantidade de finos, verifica-se uma diminuição das propriedades da argamassa. Relativamente à durabilidade da argamassa, esta é focada principalmente na permeabilidade e resistência à entrada de sulfatos. Deste modo, foi possível concluir que, em

geral, a incorporação de pó de calcário em substituição do cimento ou aos agregados miúdos melhora a impermeabilização da argamassa (Wang et al, 2018).

2.3. Agressões ambientais

Tal como foi referido anteriormente, a preocupação com o meio ambiente cresce exponencialmente em todo o mundo. Os resíduos originados do corte de calcário, mármore, granito, entre outras rochas ornamentais, são os principais causadores de impactes ambientais devido à sua grande acumulação apresentando uma baixa taxa de aproveitamento, sendo um processo altamente insustentável.

Em primeiro lugar, o mineral é extraído em grandes blocos e posteriormente é moldado no tamanho desejado. Em seguida é realizado uma operação de polimento com o objetivo de oferecer ao produto final uma textura brilhante e lisa. Deste modo, estima-se que haja um desperdício entre 30 e 40% do total de rochas ornamentais extraídas e consequentemente descartado como resíduo (Almeida et al, 2007).

Ao longo do tempo, tem se verificado um aumento exponencial na produção destes resíduos, justificado pela crescente procura e consequente transformação das pedras ornamentais. Os resíduos em forma de lama ou de pó são descartados em aterros e o restante é descartado de forma inconsciente, quer seja junto de terrenos agrícolas ou terrenos florestais, quer seja junto a fontes de águas próximas. Como é expectável, este tipo de ações representam uma grande ameaça ao meio ambiente e à saúde humana devido à contaminação dos solos, ar e água (Algin e Turgut, 2008).

Segundo relatórios e estudo disponíveis, concluiu-se que nas zonas onde existe descarga de resíduos de pedra (Figura 2.3) de forma não controlada foi possível verificar a degradação das propriedades dos solos em questão e migração de várias doenças respiratórias através de ações como o vento e chuva (Rana et al, 2015).

Estes são apenas algumas das muitas problemáticas a nível mundial que requerem uma mudança drástica, sendo que uma possível solução mais sustentável seria a utilização destes resíduos na indústria da construção, mais concretamente no desenvolvimento de argamassas ou betões.



Figura 2.3 – Descarga de resíduo proveniente do corte de pedra natural (Pontes e Vidal, 2005)

2.4. Metodologia DOE (Design of experiments)

A metodologia Design of Experiments (DOE) constitui um corpo de conhecimento desenvolvido para auxiliar profissionais e investigadores a desenvolver o seu trabalho com máxima eficiência minimizando o consumo de recursos, enquanto se garante a recolha de máxima quantidade de informação das experiências realizadas e a validade das conclusões e interferências feitas com base nelas. Existem diferentes soluções DOE para lidar com cada caso particular, que por sua vez têm objetivos diferentes a ser alcançados, entre os quais: triagem, caracterização ou modelação de processos, otimização e robustez (Correia, 2022).

Em seguida, é apresentado um esquema que retrata de forma generalizada a metodologia DOE ilustrada na Figura 2.4. A descrição do modelo DOE desenvolvido no presente trabalho será abordada no capítulo 5.

Esta metodologia permite obter uma estimativa otimizada de um grupo de parâmetros (fatores ou variáveis de entrada) que otimizam uma resposta particular, estudar os efeitos principais e as interações entre os parâmetros iniciais e, conseqüentemente, encontrar a combinação ideal dos múltiplos parâmetros dentro do domínio do problema. Deste modo, o procedimento habitual nesta metodologia consiste em identificar e declarar o problema, definir o programa experimental, realizar os ensaios e recolher os dados, executar uma análise prévia dos dados, desenvolvimento do modelo de previsão com base nos dados, validação, análise de dados, conclusão e recomendações. A otimização referida anteriormente pode incluir alcançar um máximo, mínimo ou estar dentro de um determinado intervalo de confiança (Delarami et al, 2021).

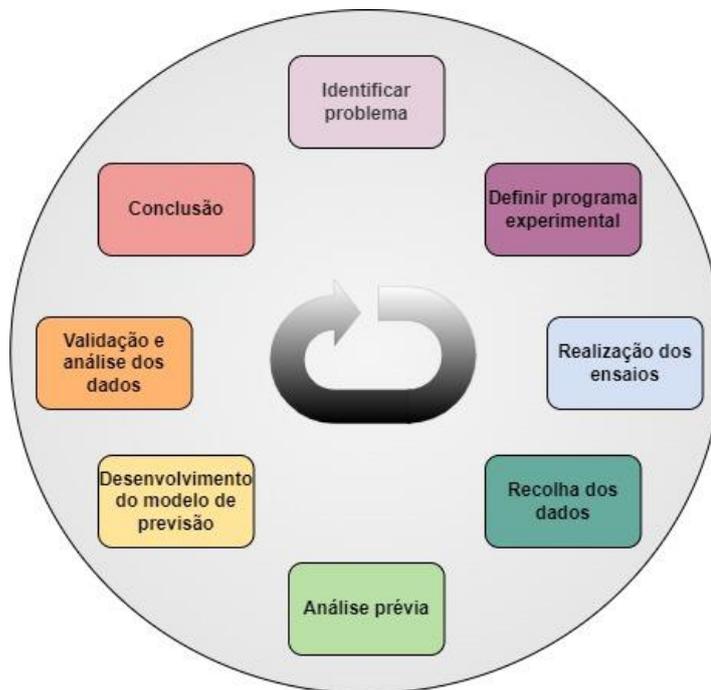


Figura 2.4 - Esquema da metodologia DOE

3. TRABALHO LABORATORIAL

Neste capítulo será apresentado o procedimento experimental que visa avaliar a viabilidade da incorporação de resíduo de corte de pedra (RCP), provenientes de operações de transformação industrial de pedra natural, em diferentes formulações de argamassas. Apresentam-se os métodos de ensaio utilizados, bem como a caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas. A análise dos resultados obtidos nos ensaios será apresentada no capítulo seguinte.

3.1. Materiais e métodos

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da utilização de RCP como substituto parcial do ligante em argamassas. Para o efeito, estudaram-se 20 formulações, que continham pó de pedra (calcário) na sua composição, como substituto do ligante, em percentagens que variam de 5% a 30%, com incrementos de substituição de 5%. Além disso, foram preparadas duas misturas de referência, sem adição de pó de pedra, sendo que uma delas incluiu um superplastificante. Relativamente aos ligantes principais utilizados, consideraram-se quatro tipos: pó de pedra calcária (RCP), cimento Portland I 42,5 R (C), cal hidráulica (CH), escórias (E) e cimento + cal hidráulica (C+CH). Consideraram-se ainda traços ligante/agregado que variavam entre 1:2.5 e 1:5.0, com incrementos de 0.5.

No que diz respeito ao processo de produção das misturas, utilizou-se uma metodologia designada DOE, detalhada no capítulo 5 a qual permitiu a análise de somente 20 misturas, em detrimento das 144 combinações possíveis com as variáveis analisadas (6 traços \times 6 níveis de substituição de RCP \times 4 tipos de ligante). A metodologia DOE foi igualmente utilizada para a análise dos resultados obtidos, e obtenção de modelos que permitam a previsão de desempenho de misturas com diferentes composições.

Os parâmetros considerados na metodologia DOE estão relacionados com o tipo de ligante utilizado, o traço das argamassas e a percentagem de substituição parcial de RCP por ligante. Através da definição inicial desses parâmetros no software utilizado, mais concretamente o *JMP Pro 2017*, é possível encontrar combinações representativas, entre os múltiplos parâmetros dentro do domínio do problema, resultando assim nas misturas analisadas.

Para validação dos modelos e da metodologia utilizada, uma vez finalizadas as 20 misturas mencionadas anteriormente, procedeu-se à realização de mais 4 misturas de validação. Os

resultados obtidos experimentalmente com estas quatro misturas foram correlacionados com a previsão gerada utilizando o modelo DOE, servindo de validação da mesma.

A partir da visualização da Figura 3.1, é possível obter uma compreensão mais clara e acessível do conteúdo previamente descrito.

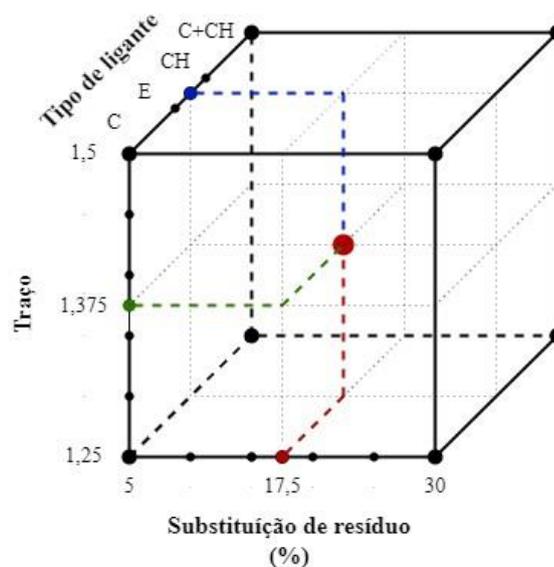


Figura 3.1 - Domínio gráfico do modelo

Consideram-se três parâmetros de entrada: tipo de ligante, traço e percentagem de substituição do ligante por RCP. Definiram-se ainda os níveis de variação destes parâmetros a ter em consideração no estudo. Após a especificação desses parâmetros preliminares, o software procedeu à formulação de composições que incorporam diversas proporções de substituição de resíduos, traços e tipos de ligantes. A produção das argamassas estudadas foi realizada no laboratório de geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

No desenho otimizado das misturas realizadas para este estudo, como foi referido anteriormente, foram definidas pelo *software JMP Pro 2017*, utilizando a metodologia DOE e cuidadosamente selecionadas tendo em consideração um conjunto de fatores, como a percentagem de substituição de pó de pedra, o traço da mistura e o tipo de ligante. Na Tabela 3.1 são apresentadas todas as composições das misturas produzidas.

Tabela 3.1 - Composições estudadas

Mistura	Substituição de pó (%)	Traço	Tipo de ligante
REF-1	0	1:2,5	C
REF-2	0	1:2,5	C
M1	5	1:1,25	E
M2	5	1:1,25	C
M3	30	1:1,25	C
M4=M15	5	1:1,5	C+CH
M5	30	1:1,25	CH
M6=M14	17,5	1:1,375	E
M7	5	1:1,25	CH
M8	30	1:1,5	CH
M9	30	1:1,25	C+CH
M10	30	1:1,25	C+CH
M11	30	1:1,5	C
M12	5	1:1,5	C
M13	5	1:1,5	CH
M14=M6	17,5	1:1,375	E
M15=M4	5	1:1,5	C+CH
M16	30	1:1,5	E
M17=M6=M14	17,5	1:3,75	E
M18	17,5	1:3,75	C
M19	17,5	1:3,75	CH
M20	17,5	1:3,75	C+CH
MV1	10	1:3,0	C
MV2	20	1:3,0	CH
MV3	20	1:4,0	E
MV4	25	1:4,5	C+CH

Importa destacar alguns aspetos, mais especificamente em relação à mistura de referência REF-2 e às misturas que fizeram uso do ligante de escórias, nomeadamente as misturas M1, M6, M14, M16, M17 e MV3. Começando pela mistura de referência REF-2, a sua composição é idêntica à da mistura de referência REF-1, com a exceção de que possui adição de superplastificante, enquanto a mistura REF-1 não contém essa adição. O superplastificante foi utilizado numa quantidade equivalente a 0.5% da quantidade total do ligante utilizado na

respetiva mistura. Após determinar a quantidade correta, o superplastificante foi diluído na água que seria adicionada durante a preparação da amassadura.

No que diz respeito às misturas com escórias, é necessário fazer a sua ativação, isto é, acelerar o processo de dissolução das partículas. Como tal, é necessário adicionar cal hidratada numa quantidade correspondente a 4% da quantidade total do ligante de escórias utilizado na mistura. Esta adição é necessária uma vez que as reações de hidratação das misturas que fazem uso deste tipo de ligante são mais lentas e a presa, é geralmente retardada, comparativamente com os outros ligantes utilizados (Gomes, 2018).

3.1.1. Materiais utilizados

Antes de descrever os procedimentos efetuados para executar as misturas, bem como os diferentes métodos de ensaio, foi realizada uma caracterização dos materiais utilizados, incluindo os ligantes e o agregado correspondentes. Os materiais foram cuidadosamente selecionados e analisados para garantir uma base sólida dos resultados obtidos nos ensaios realizados. Os materiais utilizados são os abaixo descritos.

Tabela 3.2 - Materiais utilizados na confeção das argamassas

Agregados	Ligantes
Areia	Cimento Portland I 42,5 R
-	Resíduo de corte de pedra calcária
-	Escórias
-	Cal hidráulica
-	Cal hidratada
-	Superplastificante

- **Areia**

A areia utilizada foi fornecida pela empresa Armazéns do Calhabé - Coimbra. A caracterização do agregado será apresentada posteriormente, na secção 3.2.

- **Cimento**

O cimento Portland I 42,5 R utilizado como ligante na formulação da maioria das argamassas realizadas, foi produzido na empresa CIMPOR, mais concretamente no centro de produção de Souselas.

- **Pó de pedra de calcário**

O pó de pedra utilizado foi disponibilizado pela empresa SOLANCIS, sediada em Leiria.

- **Escórias**

As escórias utilizadas na formulação das argamassas foram disponibilizadas pela empresa CIMPOR, tendo por origem a Turquia.

- **Cal hidráulica**

A cal hidráulica utilizada, produzida na empresa CIMPOR, dispunha de uma classificação HL5.

- **Cal hidratada**

A cal hidratada foi obtida através da empresa Calcidrata, sediada em Santarém.

- **Superplastificante**

O superplastificante utilizado foi o Viscocrete 3009, tendo sido disponibilizado pela empresa Sika.

Na Figura 3.2, são apresentados todos os materiais utilizados na execução das diversas misturas de argamassa.

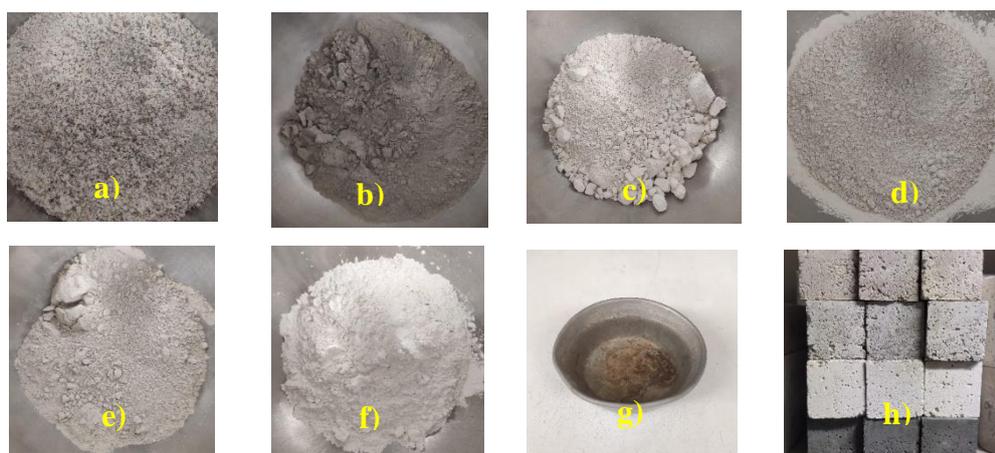


Figura 3.2 - Materiais utilizados na confeção das argamassas: a) Areia, b) Cimento; c) Pó de pedra; d) Escórias; e) Cal hidráulica; f) Cal hidratada; g) Superplastificante; h) Alguns dos provetes confeccionados com os diversos materiais utilizados

3.1.2. Produção das misturas e dos provetes de ensaio

Relativamente ao processo de produção das misturas, foi executado em conformidade com a norma EN 1015-2 (1998), utilizando a misturadora mecânica da marca *Sammic*, modelo BM-11, retratada na Figura 3.3-a). Inicialmente, cada um dos materiais utilizados na produção das argamassas, entre os quais, a água, o agregado e os respetivos ligantes, foram pesados cuidadosamente de acordo com as proporções pré-estabelecidas e colocados num recipiente próprio. Para isso, foi utilizada uma balança com precisão de 0,1g (Figura 3.3-b)), que por sua vez permite obter resultados precisos e garantir a repetibilidade do processo.



Figura 3.3 - a) Misturadora utilizada; b) Pesagem do agregado e ligante(s) de cada uma das amassaduras

Após essa pesagem, o recipiente onde foram adicionados o agregado e o(s) ligante(s) é colocado na misturadora mecânica e dá-se o arranque desta. Este equipamento tem a capacidade de permitir uma mistura homogénea dos materiais, garantindo a uniformidade de cada uma das argamassas e evitando a formação de grumos. Os elementos referidos são misturados durante um período de 60 segundos, sendo que ao fim desse tempo interrompe-se o funcionamento da máquina. Posteriormente, procede-se à adição da água de forma controlada e dá-se o novo arranque da misturadora, que mantém a velocidade durante 120 segundos. Ao fim desse tempo força-se a segunda paragem, com o objetivo de retirar o excesso de argamassa que se encontra nas paredes do recipiente com recurso a uma espátula metálica (Figura 3.4-a)). Após esse período, reativa-se o normal funcionamento da máquina durante um período de 90 segundos até a amassadura se dar por concluída, como ilustrado na Figura 3.4-b).

Depois de realizada cada uma das amassaduras, prepararam-se os diversos provetes, tendo em consideração a norma EN 1015-11 (1999):

- 6 provetes prismáticos com dimensões $160 \times 40 \times 40$ [mm³];
- 4 provetes cilíndricos com dimensões 70 de diâmetro \times 70 de altura [mm³];
- 6 provetes cilíndricos (discos) com dimensões 100 de diâmetro \times 50 de altura [mm³];

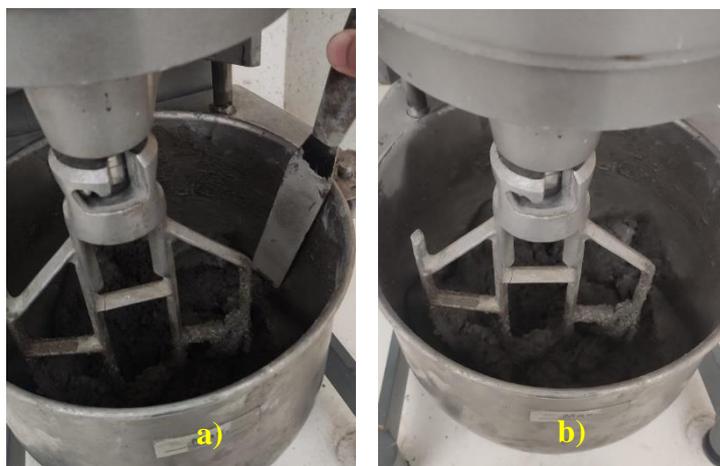


Figura 3.4 - a) Utilização da espátula metálica para retirar os excessos de argamassa nas paredes do recipiente; b) Conclusão da amassadura

Antes do preenchimento dos moldes prismáticos, apresentados na Figura 3.5-a), foi aplicado óleo descofrante, com o objetivo de facilitar o processo de desmolde dos mesmos. Relativamente aos provetes prismáticos, foram confeccionados por meio do preenchimento de moldes em aço inoxidável (Figura 3.5-b)).

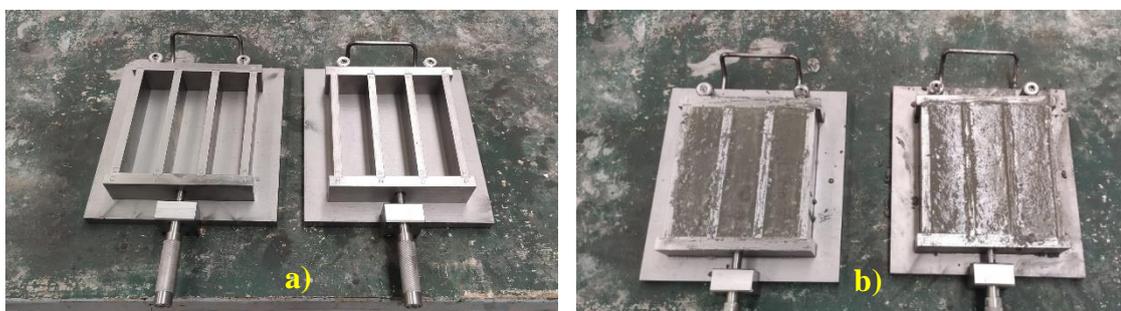


Figura 3.5 - a) Moldes prismáticos utilizados; b) Moldagem dos provetes prismáticos

Por outro lado, os provetes cilíndricos foram confeccionados por meio do preenchimento de moldes em tubagem plástica, apresentados na Figura 3.6-a), com as dimensões referidas anteriormente para cada um dos casos. No que diz respeito à moldagem destes provetes, foi necessário considerar um aspeto importante, no que diz respeito ao corte dos moldes ao longo da sua altura para facilitar o desmolde. Como tal, foi necessário recorrer à utilização de uma braçadeira plástica ao longo da envolvente de cada um dos moldes de modo a mantê-los estanques durante o processo de moldagem.

A moldagem dos provetes prismáticos foi dividida em duas fases. Na primeira, foi preenchido metade do volume dos moldes e compactado com 25 pancadas na mesa de compactação, de forma a evitar a acumulação de vazios no seu interior. Na segunda fase, colocou-se a segunda camada de argamassa até ao preenchimento total do molde e voltou-se a dar mais 25 pancadas. Por último, procedeu-se à uniformização da superfície superior de argamassa com uma espátula (Figura 3.6-b)). No caso dos provetes cilíndricos, foi realizada apenas uma compactação no nível superior do molde e algumas pancadas nas paredes do mesmo para reduzir vazios, seguida pela uniformização da argamassa na face superior. Para realizar a desmoldagem dos provetes (Figura 3.6-c)), foi necessário aguardar um período de aproximadamente 24 horas, durante o qual estes permaneceram contidos nos moldes, protegidos por películas plásticas, com o intuito de assegurar uma cura mais controlada. No entanto, as misturas que continham escórias necessitaram de permanecer nos moldes durante um período de 48 horas, uma vez que a cura, nesses casos, é mais lenta comparativamente com as restantes misturas realizadas. Após esse período, os moldes são cuidadosamente desmontados para evitar danificar os provetes.



Figura 3.6 - a) Moldes cilíndricos utilizados; b) Moldagem dos provetes cilíndricos; c) Aspeto final dos provetes após a sua desmoldagem

Após o processo de desmoldagem, os provetes produzidos são transferidos para uma câmara húmida, ilustrada na Figura 3.7 e que possui uma humidade relativa controlada de $98\pm 2\%$ e uma temperatura controlada de $20\pm 2^\circ\text{C}$. Os provetes permanecem dentro dessa câmara até à data dos respetivos ensaios mecânicos e de durabilidade.



Figura 3.7 - Introdução dos provetes na câmara húmida

3.1.3. Métodos de ensaio realizados

As argamassas desenvolvidas, para desempenharem as funções que lhe são exigidas necessitam de satisfazer determinados critérios de qualidade. Como tal, foram realizados alguns ensaios relacionadas com aspetos de resistência mecânica e durabilidade. Para estudar o primeiro parâmetro, foram realizados ensaios de resistência à flexão, à compressão e à tração por compressão diametral. Relativamente a aspetos de durabilidade, foram realizados ensaios de penetração de cloretos e de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas.

Em seguida, cada um dos ensaios supramencionados será descrito de forma breve, uma vez que, na secção 3.3 será feita uma análise mais detalhada de cada um desses ensaios.

- **Ensaio de determinação de resistência à flexão**

Este tipo de ensaio tem como objetivo determinar a tensão de rotura à flexão, o módulo de rotura e o módulo de elasticidade à flexão. Pode ser realizado com provetes apoiados em três ou quatro pontos. Geralmente são utilizados os mesmos equipamentos dos ensaios de compressão (prensa), sendo apenas alteradas as condições de apoio dos provetes (Mendes, 2017).

- **Ensaio de determinação de resistência à compressão**

Este ensaio consiste na aplicação uniaxial de carga compressiva que vai aumentando sucessivamente de forma constante aplicada a um provete com o objetivo de determinar a resistência à compressão. O que importa retirar é a relação entre a deformação linear em função da carga axialmente aplicada ao longo do tempo (Mendes, 2017).

- **Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral**

Este ensaio consiste na determinação da resistência à tração de um determinado provete em estudo por compressão diametral, sendo que para este caso terão de ser utilizados provetes cilíndricos. Essa resistência é obtida através da colocação de um desses provetes num determinado equipamento (prensa) que por sua vez aplica uma força de compressão num alinhamento da face lateral do provete, que por sua vez rompe por tração (Gouveia, 2016).

- **Ensaio de penetração de cloretos**

Este ensaio corresponde à análise ao longo do tempo da evolução da concentração de cloretos de uma dada solução. Inicialmente essa solução encontra-se pura e posteriormente poderá sofrer contaminação através do provete em análise, que por sua vez, estabelece ligação com uma outra solução inicialmente contaminada (Gouveia, 2016).

- **Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (Pundit)**

Este tipo de ensaio corresponde à transmissão e receção de ondas sonoras de alta frequência (superior a 20.000Hz) através de um determinado material em estudo, neste caso, os provetes de argamassa com as diversas composições de resíduo. O objetivo é medir o tempo da propagação dessas ondas emitidas no material até um determinado ponto. Sabendo a distância entre os pontos em análise, nomeadamente os pontos de transmissão e receção das ondas, é possível estimar a velocidade média no trecho de propagação (Araújo, 2022).

3.2. Ensaio de caracterização do agregado utilizado nas argamassas

A caracterização do agregado (areia) utilizado na formulação de todas as misturas realizadas é efetuada através da análise granulométrica, do ensaio da massa volúmica e do ensaio da baridade.

3.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica do agregado é um processo que envolve a determinação da dimensão de todas as partículas constituintes do material analisado, com o objetivo de identificar as suas

características físicas. Foi utilizado o método de peneiração segundo a norma NP EN 933-1 (2014), a partir do qual é possível estimar uma curva granulométrica que representa a distribuição das partículas do material relativamente à sua dimensão.

Inicialmente, a amostra de agregado (Figura 3.8-a)) foi colocada numa estufa a uma temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até ficar completamente seca, durante um período de 24h. Depois de arrefecida, a amostra foi colocada num peneiro de 0.063mm com o objetivo de lavar o material e, conseqüentemente, determinar a percentagem de finos. Em seguida, a amostra foi novamente colocada na estufa, à temperatura referida anteriormente, até atingir uma massa constante e posteriormente arrefecida até à temperatura ambiente.

Posteriormente, procedeu-se à passagem da amostra por uma série de peneiros com rede de malha quadrada, apresentados na Figura 3.8-b), com aberturas de 12.5mm, 10mm, 8mm, 6.3mm, 4mm, 2mm, 1mm, 0.5mm, 0.25mm, 0.125mm e 0.063mm, respetivamente.

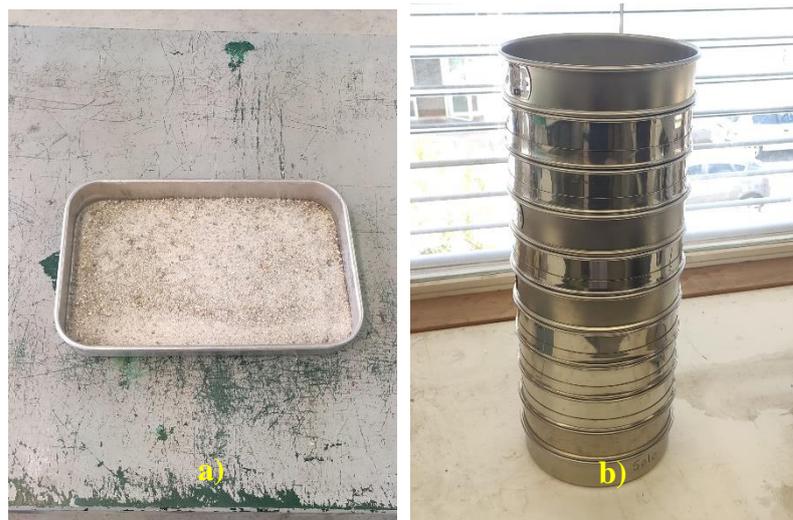


Figura 3.8 - a) Amostra utilizada; b) Peneiros utilizados na análise granulométrica do agregado

Os peneiros foram encaixados uns nos outros, em ordem decrescente em termos de abertura da malha, formando uma coluna de peneiros. Coluna essa, que foi agitada com movimentos oscilatórios rotativos. Após a agitação, os peneiros foram pesados um a um, começando pelo peneiro de maior abertura (12.5mm).

Importa ressaltar que, ao retirar os peneiros individualmente, foi feita uma nova agitação para permitir que algumas partículas presas passassem para os peneiros seguintes. Em alguns casos, foi necessário limpar a malha com uma escova apropriada. O ensaio termina quando, após um

minuto de peneiração, a massa do material retido não sofre alteração superior a 1%. A massa de material retido em cada peneiro é devidamente registada. Concluído o ensaio, procedeu-se ao traçado da curva granulométrica, que, será apresentada no capítulo seguinte.

Todos os valores supramencionados foram registados e apresentados no Anexo A.

3.2.2. Massa volúmica

Para a determinação da massa volúmica real do agregado utilizado (areia) na realização de todas as misturas de argamassa, foi considerada a norma NP-83 (1965). A massa volúmica (d_{20}^t) corresponde ao quociente da massa de um dado volume dessas partículas à temperatura do ensaio, pela massa de igual volume de água destilada a 20°C (NP-83, 1965).

A realização deste ensaio começou por se introduzir a amostra na estufa ventilada a uma temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante e em seguida deixa-se arrefecer. Em seguida, transfere-se o agregado para cada um dos picnómetros e pesa-se, conforme ilustrado na Figura 3.9-a). Para este ensaio, foram utilizados 3 picnómetros devidamente calibrados com o objetivo de obter um valor médio fidedigno.

Depois, enche-se cada um dos picnómetros até cerca de três quartos da capacidade com água destilada, isenta de ar e deixa-se embeber durante pelo menos 12h. Relativamente ao ar remanescente, extraiu-se por ebulição durante um período de 10 minutos a uma temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, e, decorrido esse período, deixa-se o picnómetro em repouso até que o seu conteúdo atinga a temperatura ambiente. Por fim, acrescenta-se água destilada até ao traço de referência (Figura 3.9-b)), enxuga-se, pesa-se e mede-se a temperatura do conteúdo em cada um dos picnómetros.

A expressão (1) permite obter a respetiva massa volúmica.

$$d_{20}^t = \frac{m_2}{m_1 - (m_3 - m_2)} \times k \quad (1)$$

Em que:

d_{20}^t – Massa volúmica, à temperatura t_x , em relação à água destilada a 20°C, em g/cm^3 ;

m_1 – Massa, em gramas, do picnómetro cheio de água, à temperatura t_x ;

m_2 – Massa, em gramas do provete seco;

m_3 – Massa, em gramas, do picnómetro com o provete e a água à temperatura t_x ;

k – Quociente da densidade da água à temperatura t_x , pela densidade da água a 20°C;



Figura 3.9 - a) Pesagem do picnómetro com agregado; b) Enchimento do picnómetro com água até à superfície do mesmo

3.2.3. Baridade

A baridade (ρ_b) refere-se à massa do agregado seco que ocupa um determinado volume, contabilizando o volume de vazios entre as partículas de agregado. A determinação da baridade do agregado utilizado em todas as misturas é realizada de acordo com a norma NP EN 1097-3 (2002), que estabelece o método de ensaio para determinar a baridade e o volume de vazios dos agregados.

O primeiro passo na realização deste ensaio consiste na pesagem do recipiente vazio que deve estar seco e limpo, com recurso à balança apresentada na Figura 3.10-a). Depois da amostra ter sido colocada numa estufa ventilada a uma temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante um período de 24h, deixou-se arrefecer a amostra do agregado. Em seguida, o agregado é adicionado ao recipiente até que este esteja completamente preenchido, tomando cuidado para nivelar a superfície com a ajuda de uma colher de pedreiro sem compactar o material. Posto isto, procede-se a nova pesagem (Figura 3.10-b)).



Figura 3.10 – a) Balança utilizada; b) Pesagem do recipiente com o agregado devidamente nivelado

Com todas pesagens realizadas, e conhecendo o volume do recipiente utilizado, procede-se ao cálculo da respetiva baridade, através da expressão (2).

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2)$$

Em que,

ρ_b – Baridade do agregado, em g/dm^3 ;

m_2 – Massa do recipiente com o agregado, em g;

m_1 – Massa do recipiente vazio, em g;

V – Volume do recipiente, em dm^3 ;

3.3. Avaliação de desempenho

Na presente secção, pretende-se efetuar uma análise das propriedades mecânicas e de durabilidade das distintas composições, subsequentes ao processo de cura, com o intuito de obter informações pertinentes relativas ao seu comportamento ao longo do tempo. Como tal, foram realizados ensaios em prazos específicos, mais concretamente aos 7 e 28 dias após a execução de cada uma das amassaduras para os provetes prismáticos com dimensões $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ e provetes cilíndricos com dimensões $70 \times 70 \text{ mm}^3$, enquanto para os provetes cilíndricos (discos) com dimensões $100 \times 50 \text{ mm}^3$ os ensaios foram realizados apenas ao fim de 28. Estes prazos são importantes a ter em conta, porque correspondem a diferentes estágios

de cura e podem fornecer informações sobre como as propriedades de cada argamassa evoluem ao longo do tempo.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, é possível avaliar as resistências à flexão (f_f), à compressão (f_c) e à tração por compressão diametral ($f_{t,D}$), no que diz respeito ao comportamento mecânico. Relativamente a questões direcionadas à durabilidade, podem ser avaliados aspetos relativos à resistência à penetração de cloretos (P_{cl}) e à velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (v_p) no material.

3.3.1. Desempenho Mecânico: resistência à flexão, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral

Começando pelos ensaios à flexão e compressão, foi necessária a utilização de três provetes prismáticos para cada uma das idades de cura. Inicialmente, realizou-se o ensaio à flexão e posteriormente o ensaio à compressão, uma vez que, para a realização deste último, podem ser aproveitadas as “metades” de cada um dos provetes originadas pelo ensaio à flexão. Esta sequência foi adotada para otimizar o uso dos provetes e facilitar a realização dos ensaios.

Relativamente ao ensaio à flexão, foi utilizada a máquina apresentada na Figura 3.11-a), mais concretamente uma máquina *GDS* com uma célula de carga de 10kN e uma velocidade de ensaio de 0,6 N/s. Coloca-se um provete horizontalmente, apoiado sobre dois apoios cilíndricos da máquina de ensaio (Figura 3.11-b)). Em seguida, é aplicada uma carga gradualmente crescente na região central do provete, o que provoca uma deformação na forma de curvatura até ocorrer a respetiva rotura, tal como é ilustrado na Figura 3.11-c). Após a identificação de cada um dos valores da força de rotura de cada um dos provetes, pode-se determinar a tensão de rotura à flexão, tendo sido utilizada a expressão (3).

$$f_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{d_1 \times d_2^2} \quad [MPa] \quad (3)$$

Em que:

f_f – Tensão de rotura à flexão, em MPa;

F_f – Carga aplicada a meio-vão que provoca a rotura, em N;

L – Distância entre os apoios cilíndricos, em mm;

d_1 e d_2 – Dimensões das arestas do topo do provete, em mm;

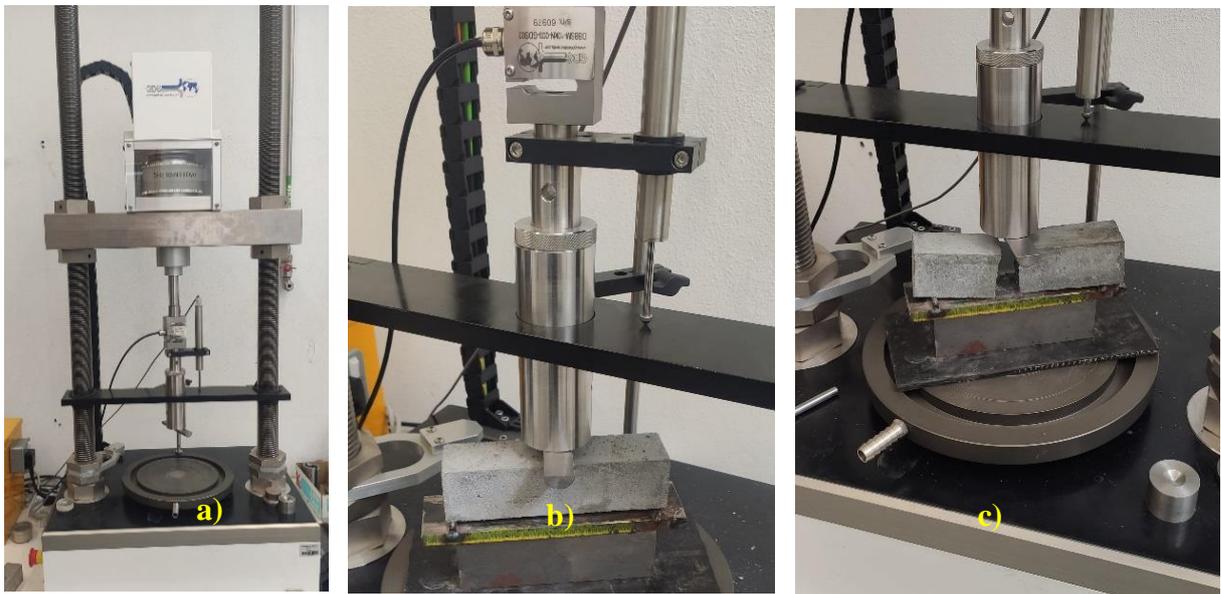


Figura 3.11 - a) Aparelho utilizado no ensaio de resistência à flexão; b) Realização do ensaio de resistência à flexão; c) Rotura de um dos provetes na realização do ensaio de resistência à flexão

Finalizado o ensaio à flexão, procede-se ao ensaio de compressão noutra máquina e com algumas diferenças nas condições de apoio. Neste ensaio, cada uma das “metades” descritas anteriormente é centralizada no prato inferior da máquina (Figura 3.12-b)). O prato é então baixado até que entre em contacto com a face superior do provete e em seguida é aplicada uma carga gradualmente crescente até que se verifique a rotura. Para a realização deste ensaio, foi utilizada a máquina apresentada na Figura 3.12-a) da marca *Servosis* com uma célula de carga de 100 kN e uma velocidade de ensaio correspondente a 0,010 mm/s.

Num processo semelhante ao ensaio de resistência à flexão, para o ensaio à compressão foram registados todos os valores de rotura (Figura 3.12-c)) para cada um dos provetes ensaiados e posteriormente procedeu-se ao cálculo da sua tensão de rotura à compressão, através da expressão (4).

$$f_c = \frac{F_c}{A} [MPa] \quad (4)$$

Em que:

f_c – Tensão de rotura à compressão, MPa;

F_c – Carga aplicada que provoca a rotura, em N;

A – Área da zona comprimida de cada um dos provetes, em mm²;



Figura 3.12 - a) Aparelho utilizado no ensaio de resistência à compressão; b) Realização do ensaio de resistência à compressão; c) Rotura de um dos provetes na realização do ensaio de resistência à compressão

Para avaliar o comportamento mecânico do material em estudo, foi também realizado um ensaio à tração por compressão diametral para cada mistura, através do mesmo aparelho utilizado no ensaio anterior, embora o acessório utilizado tenha sido diferente, específico para este tipo de ensaios, conforme apresentado na Figura 3.13-a). Este ensaio compreende a utilização de dois provetes cilíndricos com diâmetro de 70mm e altura de 70mm, ensaiados com diferentes idades de cura. Os provetes são posicionados e centrados com precisão, com o objetivo de evitar qualquer tipo de desvio entre os pratos (Figura 3.13-b)). De seguida, é aplicada a carga a uma velocidade constante (mesma velocidade que no ensaio à compressão) de modo contínuo até que a rotura seja atingida (Figura 3.13-c)). Novamente, à semelhança aos ensaios descritos anteriormente, foi necessário determinar a tensão de rotura de cada um dos provetes, mas neste caso, a tensão de rotura à tração por compressão diametral através da expressão (5).

$$f_{t,D} = \frac{2 \times F}{b \times d \times L} [MPa] \quad (5)$$

Em que:

$f_{t,D}$ – Tensão de rotura à tração por compressão diametral, em MPa;

F – Carga aplicada que provoca a rotura, em kN;

b – Largura da chapa metálica do acessório, em mm;

d – Diâmetro do provete, em mm;

L – Altura do provete, em mm;

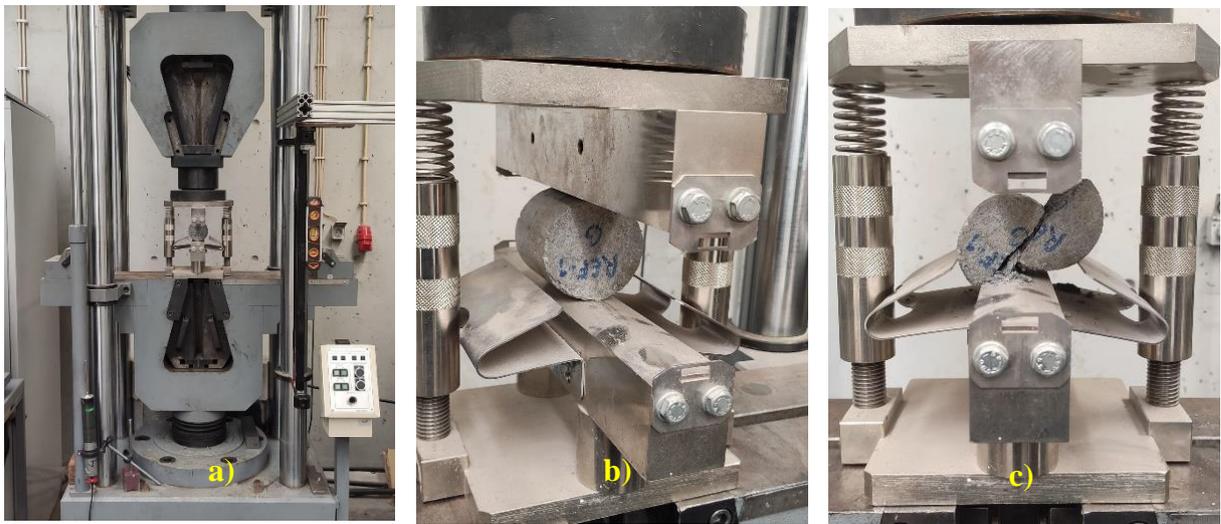


Figura 3.13 - a) Aparelho utilizado no ensaio de resistência à tração por compressão diametral; b) Realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral; c) Rotura de um dos provetes na realização do ensaio de resistência à tração por compressão dia

Os três ensaios mecânicos supramencionados foram realizados de acordo com a norma EN 1015-11 (1999), e exigindo a realização de alguns procedimentos em comum, a fim de garantir a precisão e a consistência dos resultados. Esses procedimentos incluem:

- Remoção do excesso de humidade e sujidade dos provetes: antes de realizar cada um dos ensaios, é necessário garantir que os provetes estejam limpos e secos para evitar qualquer tipo de interferência nos resultados;
- Limpeza cuidadosa das superfícies das máquinas de ensaio: é importante limpar cuidadosamente todas as superfícies das máquinas de ensaio antes e depois da realização de cada um dos ensaios para evitar quaisquer contaminações que possam afetar os resultados;
- Registo da carga máxima obtida para cada um dos ensaios: quando os provetes atingirem a rotura durante os ensaios, é necessário registar a carga máxima aplicada a cada um deles, a fim de avaliar a resistência do material;
- Ensaio de todos os provetes nas respetivas idades de cura estabelecidas: para garantir a precisão dos resultados, é necessário realizar os ensaios em todas as amostras nas idades de cura estabelecida;

3.3.2. Durabilidade: velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (PUNDIT) e penetração de cloretos

O ensaio de quantificação da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, foi realizado em todas as argamassas em estudo, depois de 28 dias de cura, com o objetivo de determinar a velocidade de propagação dessas ondas ao longo do material.

Este ensaio é importante, uma vez que permite conhecer informações precisas sobre as características do material, como a homogeneidade e possíveis defeitos nas argamassas que não sejam perceptíveis no seu exterior. Para a realização do ensaio, foi utilizada a norma NP EN 12504-4 (2007), que por sua vez estabelece os procedimentos e critérios necessários para a obtenção de resultados fiáveis.

Para a realização do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, utilizou-se um equipamento da marca *Proceq Pundit Lab+* com transdutores de 54kHz, conforme apresentado na Figura 3.14-a). O ensaio teve início com a preparação dos provetes, sendo que foram utilizados dois provetes cilíndricos (discos), com diâmetro de 100mm e altura de 50mm. Um aspeto a salientar deve-se ao facto de a norma recomendar para este ensaio a utilização de provetes prismáticos com dimensões $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$. No entanto, todos os provetes prismáticos foram utilizados para os ensaios de flexão e compressão, conforme mencionado anteriormente, pelo que se tornou inviável a utilização dos mesmos para este ensaio em particular.

De acordo com a norma apresentada, seria possível realizar o ensaio pelo método direto, semi-direto e indireto. Neste caso, o método utilizado foi o método direto, no qual os transdutores são colocados em faces opostas do material em estudo.

Após a preparação e identificação dos provetes correspondentes, o aparelho foi calibrado utilizando um acessório apropriado, que por sua vez faz o ajuste do tempo de propagação para um valor específico (25 μs) para coincidir com o valor exibido no ecrã do aparelho. Antes de posicionar os transdutores na superfície do material, foi necessário aplicar uma massa de contacto em cada uma das faces dos provetes, conforme apresentado na Figura 3.14-b). O objetivo da utilização dessa massa de contacto é garantir uma leitura mais precisa.

Neste ensaio, um dos transdutores foi responsável pela emissão das ondas, enquanto o outro as recebeu (Figura 3.14-c)). Por fim, os tempos de propagação das ondas (μs) foram registados para cada um dos provetes (Figura 3.13-c) e, ao final de cada ensaio, os excessos de massa de contacto presentes nesses provetes e nos transdutores foram removidos.

O tempo de propagação das ondas para cada mistura corresponde à média das medições realizadas nos provetes das respectivas misturas. Com base nesse tempo obtido (μs) e no comprimento de cada corpo de prova (mm), foi possível estimar a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (m/s).



Figura 3.14 - a) Aparelho utilizado no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas; b) Massa de contacto utilizada; c) realização do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Relativamente ao ensaio de penetração de cloretos, foi necessário seguir o procedimento descrito na especificação E-463 (2004) do LNEC. O ensaio foi concretizado em três provetes cilíndricos (discos), com dimensões 100×50 [mm³], para cada uma das misturas realizadas.

Conforme o nome do ensaio refere, o propósito deste ensaio é a avaliação da penetração de cloretos em provetes de diferentes misturas. Contudo, essa penetração não é um indicador conclusivo em termos de durabilidade dos materiais. Portanto, é essencial utilizar um coeficiente de migração de cloretos, seguindo a metodologia NT BUILD 492, sendo que este corresponde a uma taxa de movimento dos iões de cloreto através dos provetes em estudo. Geralmente, indica que quanto maior for esse coeficiente, maior será a facilidade do movimento dos iões, no entanto, existem muitos fatores que podem influenciar, entre os quais, a porosidade do material, a relação água/cimento, a idade de cura, entre outros.

A expressão (6), apresentada em seguida, traduz o coeficiente de migração de cloretos.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 \times (273 + T) \times L}{(U - 2) \times t} \times \left(x_d - 0.0238 \times \sqrt{\frac{(273 + T) \times L \times x_d}{U - 2}} \right) \quad (6)$$

Em que:

D_{nssm} – Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário, $\times 10^{-12}$ m²/s;

U – Valor absoluto da tensão aplicada, em V;

T – Valor médio das temperaturas inicial e final na solução de cloreto de sódio, em K;

L – Espessura dos provetes, em m;

x_d – Valor médio das profundidades de penetração, em m;

t – Duração do ensaio, em segundos;

Após a moldagem dos provetes, estes foram submetidos a um processo de cura, mais concretamente um período de 28 dias na câmara húmida apresentada anteriormente. Após concluído o processo de cura, os provetes que seriam utilizados nos respetivos ensaios foram imersos numa tina de água, ilustrada na Figura 3.15-a), onde permaneceram por um período mínimo de 4 dias.

Decorrido esse período mínimo, retiraram-se os provetes correspondentes a 2 misturas (totalizando 6 provetes). Uma preocupação a ter em consideração durante a seleção dos provetes foi garantir que estes fossem escolhidos de misturas com composições semelhantes, ou seja, com ligantes, percentagens de substituição de pó e traços similares, a fim de evitar diferenças significativas nas voltagens, como será discutido posteriormente. Depois da seleção e remoção dos provetes da tina com água, estes foram envolvidos com fita teflon em toda a sua área lateral (Figura 3.15-b)) e, em seguida, com uma manga de borracha. Posteriormente, duas braçadeiras metálicas foram apertadas em cada uma dessas mangas, garantindo a estanqueidade entre as soluções apresentadas a seguir.

Posto isto, os provetes foram transferidos para uma nova tina com uma solução de cloreto de sódio (NaCl), sendo que cada uma das faces (faces de baixo) desses provetes ficaram em contacto com essa solução. Em seguida, procedeu-se à preparação de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) que por sua vez ficou em contacto com as faces opostas (faces de cima) dos respetivos provetes.

Posteriormente, como é possível compreender através da Figura 3.15-c), inseriram-se as escumadeiras nas mangas, estabelecendo contacto com a solução de hidróxido de sódio (NaOH) supramencionada, com a finalidade de criar um potencial elétrico por meio de uma fonte e cabos de ligação, o que resultou na penetração dos iões de cloreto no interior das argamassas.

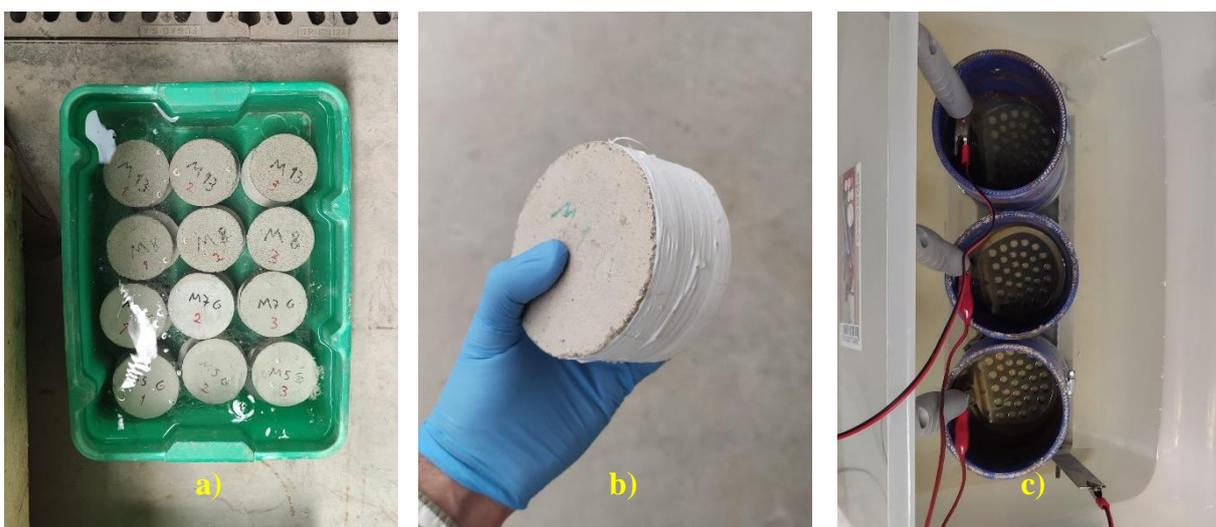


Figura 3.15 - a) Tina de água onde permaneceram todos os provetes antes da realização de cada ensaio; b) Envolvimento dos provetes com fita teflon; c) Introdução das escumadeiras no interior das mangas bem como a respetiva solução de hidróxido de sódio (NaOH)

Após se conectarem corretamente todos os cabos entre as escumadeiras e a fonte (Figura 3.16-a)), procedeu-se à leitura individual da corrente a 30V. Em seguida, determinou-se o intervalo de corrente elétrica correspondente para cada um dos provetes com recurso à Tabela 3.3 e, com base nisso, realizou-se uma nova leitura da corrente inicial admissível, a fim de verificar se essa corrente está dentro do intervalo estabelecido.

Depois, foi necessário aguardar o tempo de ensaio tendo em consideração a corrente inicial obtida para verificar se esta está dentro do intervalo correspondente para cada um dos provetes. Caso corra tudo em conformidade com o que foi descrito, o passo seguinte deste ensaio diz respeito à divisão dos provetes em duas partes e, em seguida, à pulverização destes com uma solução de nitrato de prata (Ag_2NO_3) com o objetivo de medir a profundidade de penetração dos cloretos, como é possível observar na Figura 3.16-b). Com o intuito de determinar essa profundidade, foram efetuadas 9 medições em pontos equidistantes ao longo da linha que limita a penetração dos cloretos numa das metades dos respetivos provetes, com o auxílio de um paquímetro digital (Figura 3.16-c)). Após realizar essas 9 medições em cada um dos 3 provetes de cada mistura, foi calculado o valor médio da profundidade de penetração dos cloretos



Figura 3.16 – a) Fonte utilizada e os respectivos cabos que farão a ligação; b) Pulverização das metades dos provetes com a solução de nitrato de prata; c) Medição da penetração de cloretos através de um paquímetro digital

Tabela 3.3 – Determinação do potencial a aplicar e a duração do ensaio, a partir da corrente inicial de 30V (E-463, 2004)

Corrente inicial, I_{30V} (com 30V) (mA)	Diferença de potencial aplicada, U (após o ajuste) (V)	Nova corrente inicial admissível (mA)	Duração do ensaio, t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é feita a caracterização do agregado utilizado em todas as argamassas desenvolvidas. Apresentam-se igualmente os resultados de caracterização das argamassas no seu estado endurecido. Mais concretamente, são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos após a realização dos ensaios previamente indicados, que visam caracterizar as diversas misturas produzidas. O objetivo dessa caracterização tem em vista correlacionar o comportamento de cada mistura com as características previamente definidas, nomeadamente: o tipo de ligante utilizado, o teor de substituição de RCP, e o traço ligante/agregado. Para além disso, o desempenho das argamassas produzidas com diferentes percentagens de RCP será comparado com o desempenho das argamassas de referência de modo a avaliar se são formulações viáveis.

4.1. Caracterização do agregado utilizado nas argamassas

Antes de proceder à caracterização de todas as argamassas no seu estado endurecido, é importante fazer um estudo prévio relativamente a um dos componentes que esteve sempre presente na composição das mesmas, mais concretamente o seu agregado. Relativamente às características dos ligantes utilizados, poderão ser consultados no ANEXO B.

Deste modo, serão avaliadas as suas características mais relevantes, como já foi referido no capítulo anterior, nomeadamente a sua granulometria, massa volúmica e baridade.

4.1.1. Análise granulométrica

Relativamente à análise granulométrica do agregado, são disponibilizadas no ANEXO A todas as informações relativas ao ensaio, nomeadamente, a abertura dos peneiros utilizados (mm), a massa do material retido (g), a percentagem de material retido (%), quantidade de finos que passa no peneiro 0.063 mm (%), entre outras informações relevantes.

Na Figura 4.1 é apresentada a curva granulométrica do agregado utilizado no desenvolvimento de todas as argamassas realizadas, fornecendo informações importantes sobre as suas características granulométricas, incluindo o diâmetro máximo ($D_{m\acute{a}x}$) e mínimo ($D_{m\acute{i}n}$), que são 4mm e <0,063mm, respetivamente.

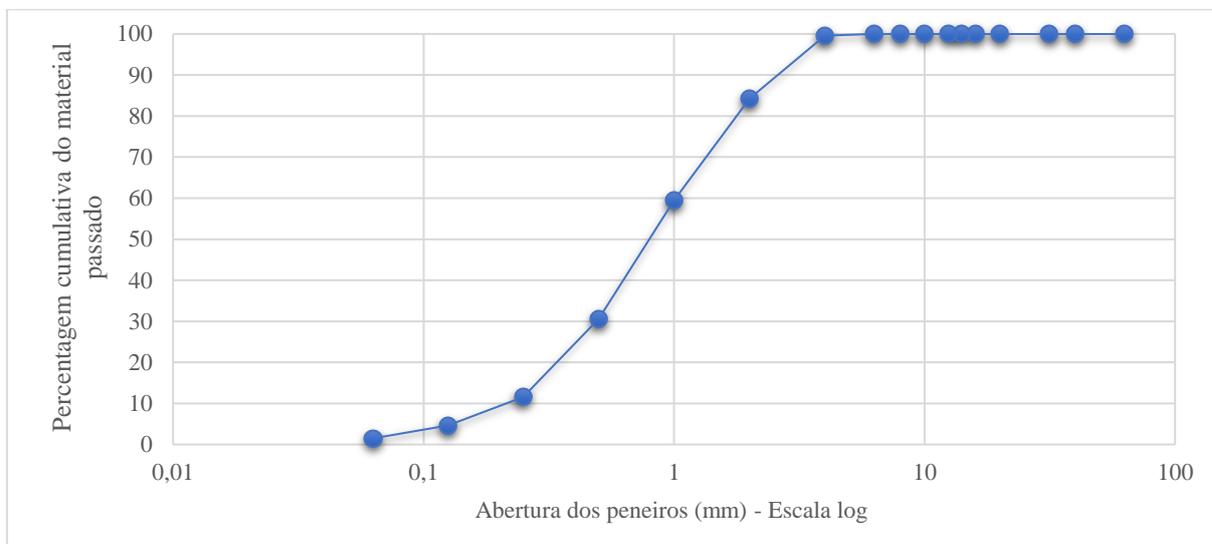


Figura 4.1 - Curva granulométrica do agregado

4.1.2. Massa volúmica

O valor obtido para a massa volúmica do agregado utilizado nas argamassas desenvolvidas foi de $2,63 \text{ g/cm}^3$.

4.1.3. Baridade

O valor obtido para a baridade do agregado utilizado nas argamassas desenvolvidas foi de $1576,52 \text{ g/dm}^3$.

4.2. Caracterização das argamassas realizadas no estado endurecido

Antes de dar início à análise pormenorizada de cada um dos ensaios, são fornecidos na Tabela 4.1 os valores médios das resistências mecânicas à flexão, à compressão e à tração por compressão diametral obtidos aos 7, 17.5 e 28 dias de cura para todas as misturas realizadas. Relativamente aos ensaios de propagação de ondas ultrassom (Pundit) e de penetração de cloretos, os resultados serão discutidos posteriormente.

Tabela 4.1 - Resistência mecânica à flexão, à compressão e à tração por compressão diametral aos 7, 17.5 e 28 dias de cura (MPa)

Mistura	Ligante	Ensaio à flexão			Ensaio à compressão			Ensaio à compressão diametral		
		7 dias	17.5 dias	28 dias	7 dias	17.5 dias	28 dias	7 dias	17.5 dias	28 dias
REF - 1	C	6,015	-	6,404	26,448	-	35,683	0,002329	-	0,003486
REF - 2	C	6,920	-	6,932	45,088	-	46,398	0,002640	-	0,003529
M1	E	1,881	-	2,262	5,378	-	5,588	0,000834	-	0,000890
M2	C	5,730	-	6,347	24,949	-	31,799	0,002756	-	0,002700
M3	C	3,513	-	3,513	10,994	-	11,648	0,001606	-	0,001188
M4=M15	C+CH	2,228	-	2,366	8,165	-	9,004	0,000525	-	0,000837
M5	CH	0,440	-	1,014	1,034	-	2,234	0,000156	-	0,000298
M6=M14	E	1,744	-	2,446	5,253	-	6,547	0,000782	-	0,000895
M7	CH	0,382	-	1,484	1,569	-	3,509	0,000230	-	0,000509
M8	CH	0,255	-	0,624	0,834	-	2,075	0,000057	-	0,000209
M9	C+CH	2,487	-	2,852	9,684	-	11,495	0,001017	-	0,002137
M10	C+CH	2,505	-	2,978	8,997	-	10,877	0,001212	-	0,002033
M11	C	3,449	-	4,160	13,595	-	16,221	0,001741	-	0,001987
M12	C	4,105	-	4,491	18,985	-	22,070	0,002858	-	0,002624
M13	CH	0,459	-	0,596	0,878	-	1,778	0,000107	-	0,000166
M14=M6	E	1,784	-	2,381	5,019	-	6,336	0,000655	-	0,000671
M15=M4	C+CH	2,245	-	2,805	9,079	-	10,020	0,000453	-	0,000677
M16	E	0,865	-	1,516	3,031	-	3,590	0,000297	-	0,000334
M17	E	-	2,033	-	-	5,953	-	-	0,000824	-
M18	C	-	5,765	-	-	23,717	-	-	0,002546	-
M19	CH	-	0,619	-	-	2,003	-	-	0,000284	-
M20	C+CH	-	3,636	-	-	12,953	-	-	0,001579	-
MV1	C	6,176	-	6,372	28,636	-	32,167	0,001979	-	0,002549
MV2	CH	0,890	-	0,999	1,378	-	2,575	0,000214	-	0,000253
MV3	E	1,455	-	1,952	4,180	-	5,025	0,000747	-	0,000873
MV4	C+CH	1,920	-	2,362	7,023	-	7,856	0,000722	-	0,000838

4.2.1. Ensaio de determinação da resistência à flexão

Na Tabela 4.1 são exibidos os valores médios da resistência à flexão (MPa) obtidos nos ensaios para cada uma das misturas realizadas, misturas essas que podem ser analisadas com maior detalhe relativamente às suas composições a partir da Tabela 3.2.

Estes resultados correspondem aos períodos de cura de 7, 17.5 e 28 dias, que por sua vez, foram exigidos pelo software utilizado na metodologia DOE. No entanto, é importante salientar que, para a maioria das misturas realizadas, os resultados obtidos para os 7 e 28 dias de cura foram ponderados, com exceção das misturas M17, M18, M19 e M20 que consideraram apenas os resultados aos 17.5 dias de cura.

Na Figura 4.2 são ilustrados os resultados apresentados na tabela anterior.

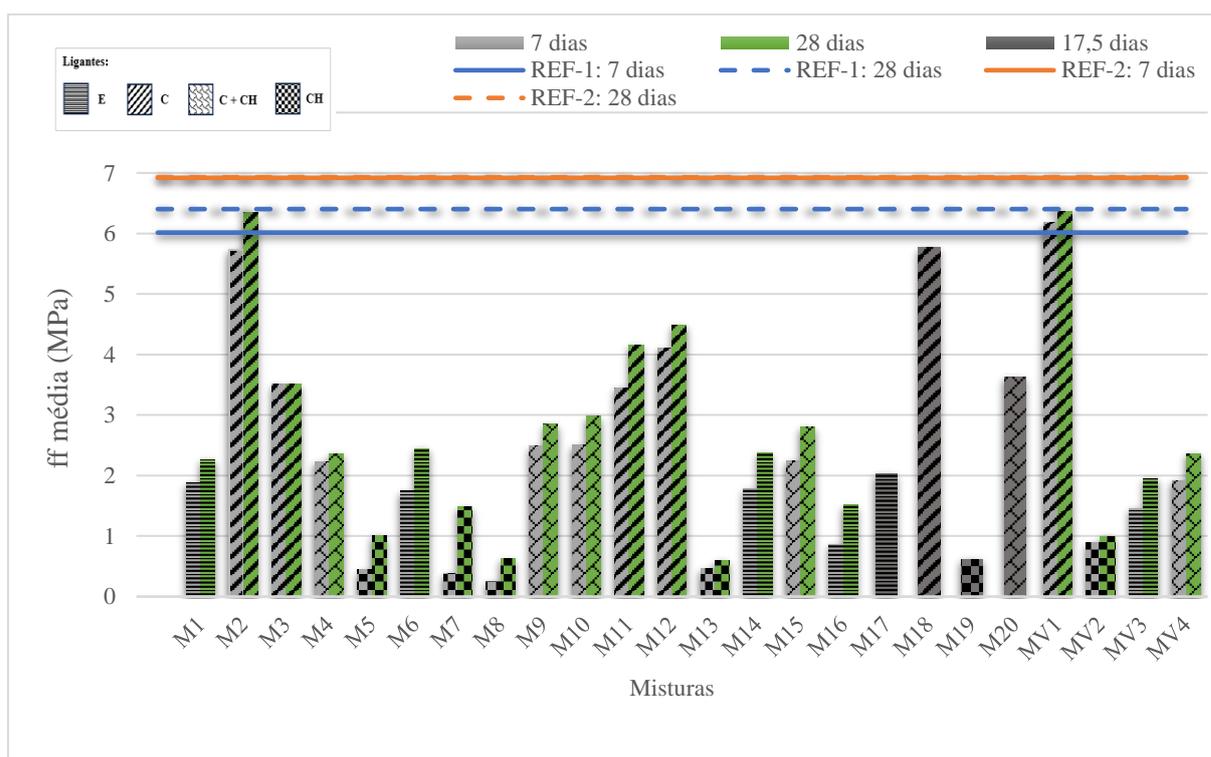


Figura 4.2 - Resistência mecânica à flexão aos 7, 17.5 e 28 dias de cura

Após analisada a figura anterior, é possível verificar que, como expectável na generalidade das argamassas realizadas, a resistência obtida aos 28 dias é superior à resistência obtida aos 7 dias de cura, à exceção das misturas REF-2 e M3 que apresentaram resultados semelhantes para as diferentes idades.

As resistências à flexão obtidas seguiram o padrão esperado, com as misturas que utilizaram cimento como ligante a apresentarem os maiores valores, seguidas pelas misturas com cimento e cal hidráulica, em terceiro lugar as misturas com ligante de escórias, e por último, as misturas com ligante de cal hidráulica. Para além do tipo de ligante utilizado, a percentagem de substituição de RCP e o traço das misturas também influenciaram as resistências obtidas, como será possível observar adiante.

Embora se tenha verificado um aumento na resistência ao longo do tempo em todas as misturas que utilizaram cimento como ligante, foi possível observar que esse aumento não foi, de facto, tão significativo em comparação com as misturas que utilizaram outros tipos de ligantes. A razão por detrás deste fenómeno deve-se ao facto de o cimento possuir uma taxa de cura extremamente acelerada, o que significa que consegue conferir uma resistência considerável aos materiais nos primeiros dias de cura. Como resultado, o aumento da resistência ao longo do tempo é menor em comparação com outros ligantes. Um aspeto a salientar deve-se ao facto de que a resistência dos provetes constituídos com cimento poder continuar a aumentar com o tempo, embora esse aumento seja cada vez mais lento em comparação com outros tipos de ligantes.

A Figura 4.3 permite oferecer uma clara perceção da evolução da resistência nos ensaios à flexão entre os períodos de 7 e 28 dias, para as respetivas misturas. Observou-se que as misturas que utilizaram cal hidráulica como ligante apresentaram os maiores ganhos de resistência, em comparação com as restantes misturas. Conforme mencionado anteriormente, as misturas com cimento obtiveram menores ganhos de resistência, seguidas pelas misturas com cimento e cal hidráulica devido à ação do cimento, e, em seguida, as misturas com escórias.

Pode observar-se que as misturas que utilizaram cal hidráulica como ligante, mais concretamente as misturas M5, M7 e M8 obtiveram um aumento de resistência mais significativo (ganhos acima de 100%) entre as duas idades de cura. Ao contrário do cimento, a cal hidráulica tem uma dificuldade inicial em ganhar resistência durante os primeiros dias de cura, mas com o tempo, a sua resistência aumenta exponencialmente.

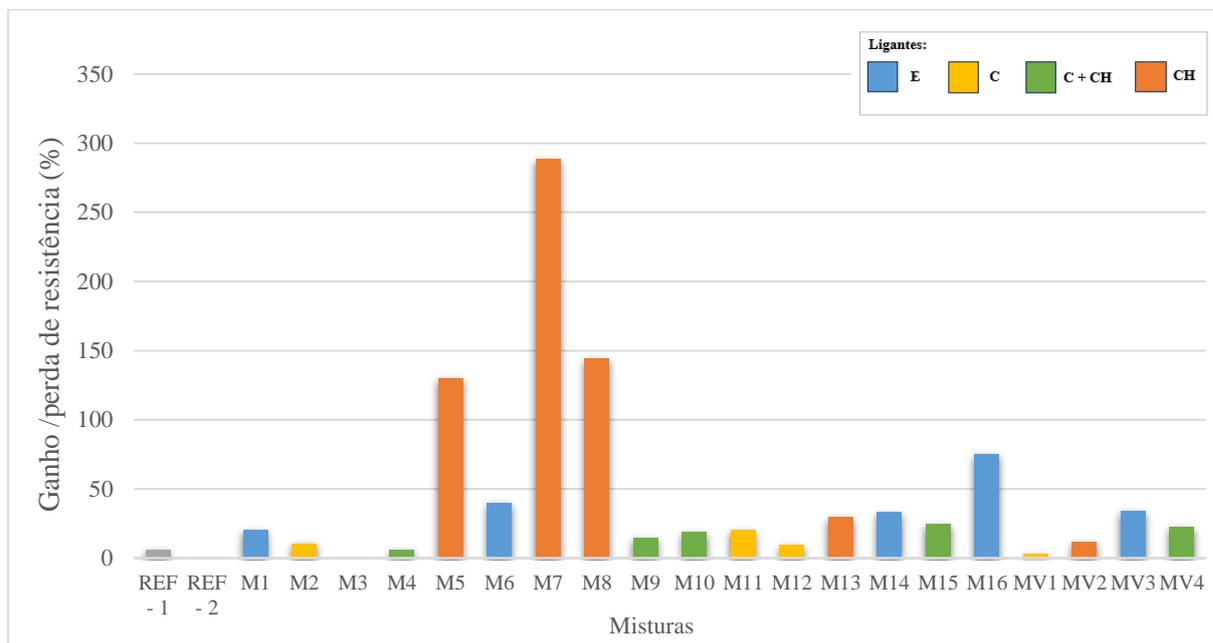


Figura 4.3 - Comparação dos ganhos de resistência nos ensaios à flexão entre os 7 e os 28 dias de cura

Quanto às misturas que fizeram uso simultâneo de cimento e cal hidráulica, constatou-se uma evolução mais limitada da sua resistência (cerca de 15%, em média), embora superior às misturas apenas com cimento, enquanto as misturas com escórias demonstraram um ganho de resistência superior (cerca de 40%, em média), mas significativamente inferior às misturas com ligante de cal hidráulica.

Posto isto, foi possível observar que existe uma relação inversa entre a resistência inicial obtida por uma mistura e os ganhos de resistência dessa ao longo do tempo. Isto é, quanto maior for a resistência inicial de uma mistura, menores serão os ganhos de resistência ao longo do tempo.

A Tabela 4.2 apresenta a variação da resistência à flexão das diferentes misturas em comparação com a mistura de referência REF-1, nos períodos de 7 e 28 dias, considerando diversos fatores, entre os quais, o tipo de ligante, o traço e a quantidade de substituição de RCP. É possível utilizar essa tabela para analisar e comparar os resultados obtidos nas diferentes misturas e verificar a influência dos aspetos mencionados na resistência das mesmas.

Tabela 4.2 - Variação da resistência à flexão (%) das diversas misturas comparativamente com a mistura REF-1 para os 7 e 28 dias

Misturas	Substituição de RCP (%)	Traço	Tipo de ligante	7 dias	28 dias
				$\frac{f_{fi}}{f_{fREF1}}$ (%)	$\frac{f_{fi}}{f_{fREF1}}$ (%)
REF - 1	0	1:2.5	Cimento	-	-
REF - 2	0	1:2.5	Cimento	15,0	8,2
M1	5	1:2.5	Escórias	-68,	-64,6
M2	5	1:2.5	Cimento	-4,7	-0,9
M3	30	1:2.5	Cimento	-41,5	-45,1
M4	5	1:5.0	Cimento + cal hidráulica	-62,9	-63,0
M5	30	1:2.5	Cal hidráulica	-92,7	-84,1
M6	17,5	1:3.75	Escórias	-71,0	-61,8
M7	5	1:2.5	Cal hidráulica	-93,7	-76,8
M8	30	1:5.0	Cal hidráulica	-95,8	-90,2
M9	30	1:2.5	Cimento + cal hidráulica	-58,7	-55,4
M10	30	1:2.5	Cimento + cal hidráulica	-58,4	-53,4
M11	30	1:5.0	Cimento	-42,7	-35,0
M12	5	1:5.0	Cimento	-31,8	-29,8
M13	5	1:5.0	Cal hidráulica	-92,4	-90,6
M14	17,5	1:3.75	Escórias	-70,4	-62,8
M15	5	1:5.0	Cimento + cal hidráulica	-62,7	-56,2
M16	30	1:5.0	Escórias	-85,6	-76,3
MV1	10	1:3.0	Cimento	2,7	-0,4
MV2	20	1:3.0	Cal hidráulica	-85,2	-84,4
MV3	20	1:4.0	Escórias	-75,8	-69,5
MV4	25	1:4.5	Cimento + cal hidráulica	-68,1	-63,1

Após a análise da tabela anterior, conclui-se que as misturas M2 e MV1 apresentam resistências à flexão muito semelhantes aos valores de referência, apesar da presença de RCP como substituto parcial do ligante. A mistura MV1 alcança valores superiores aos da mistura REF-1, na ordem dos 3% aos 7 dias de cura e uma diminuição de cerca de 0,5% ao fim dos 28 dias de cura, enquanto a mistura M2 obtém valores ligeiramente inferiores, na ordem de 5% e 1% aos 7 e 28 dias de cura, respetivamente. Assim, pode-se afirmar que as misturas com substituição de pó de pedra por ligante de cimento entre 5% e 10% são capazes de proporcionar resistências semelhantes e até superiores às argamassas de referência utilizadas atualmente, relativamente a este ensaio.

4.2.2. Ensaio de determinação da resistência à compressão

Na Tabela 4.1 são exibidos os valores médios da resistência à compressão (MPa) obtidos nos ensaios para cada uma das misturas realizadas. À semelhança do que foi referido para o ensaio à flexão, os resultados apresentados na tabela anterior dizem respeito aos períodos de cura de 7, 17.5 e 28 dias, sendo que os resultados obtidos para os 7 e 28 dias de cura foram considerados para todas as misturas, novamente com exceção das misturas M17, M18, M19 e M20.

Na Figura 4.4 são ilustrados os resultados apresentados na tabela anteriormente apresentada.

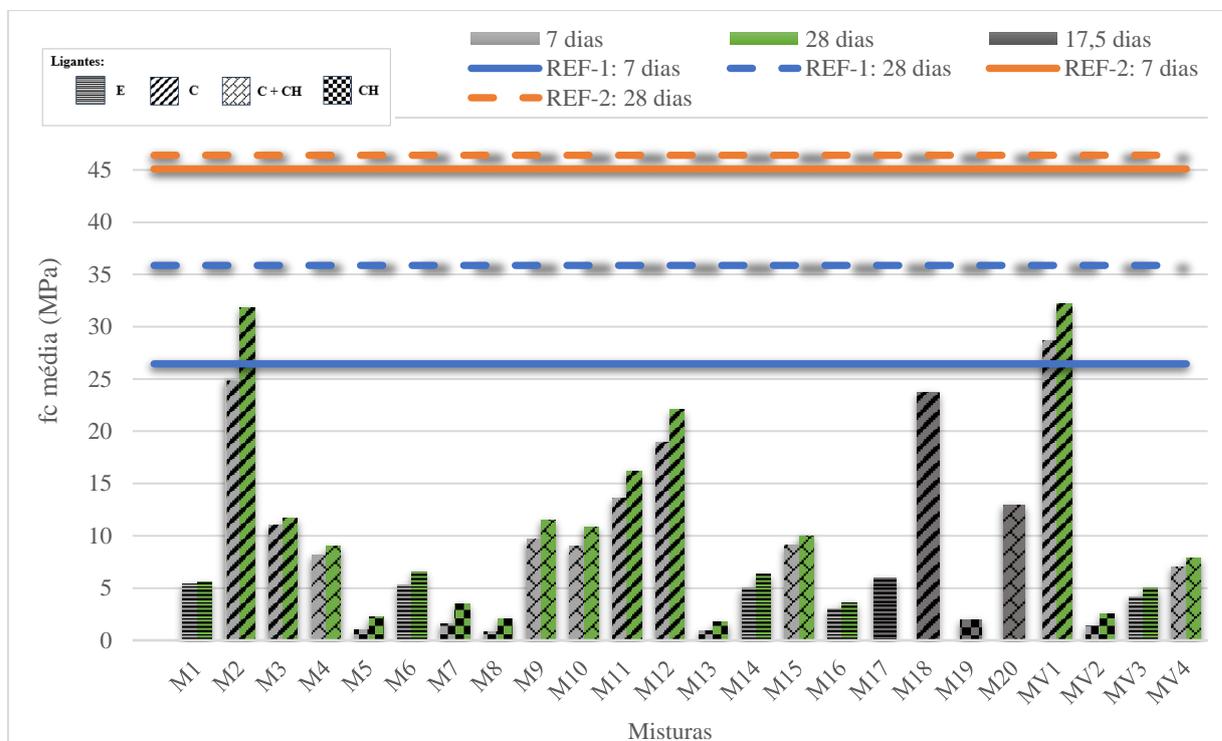


Figura 4.4 - Resistência mecânica à compressão aos 7, 17,5 e 28 dias de cura

Novamente, seria expectável que a resistência à compressão obtida aos 28 dias fosse superior à resistência obtida aos 7 dias. Quanto às resistências obtidas, a ordem de classificação foi igual à ocorrida nos ensaios à flexão, sendo que as misturas que obtiveram melhores desempenhos foram as misturas constituídas por cimento, seguidas pelas misturas com ligante de cimento e cal hidráulica, em terceiro pelas misturas compostas com escórias e por último as misturas constituídas por cal hidráulica.

Recorrendo à Figura 4.5, é possível compreender que, à semelhança do sucedido para os ensaios à flexão, as misturas que continham cimento como ligante apresentaram um aumento de resistência no tempo menor (cerca de 15%, em média) em comparação com a maioria das restantes misturas.

Por outro lado, as misturas com escórias não mostraram um aumento significativo de resistência à compressão (cerca de 15%, em média) entre os 7 e 28 dias de cura, em comparação com o aumento de resistência à flexão. Em relação às outras misturas, o ganho de resistência foi semelhante ao observado nos ensaios à flexão, sendo que, as misturas que utilizaram ligante à base de cimento e cal hidráulica apresentaram um aumento de resistência, em média, de cerca de 15%, enquanto as misturas compostas apenas por cal hidráulica tiveram aumentos de resistência superiores a 100%.

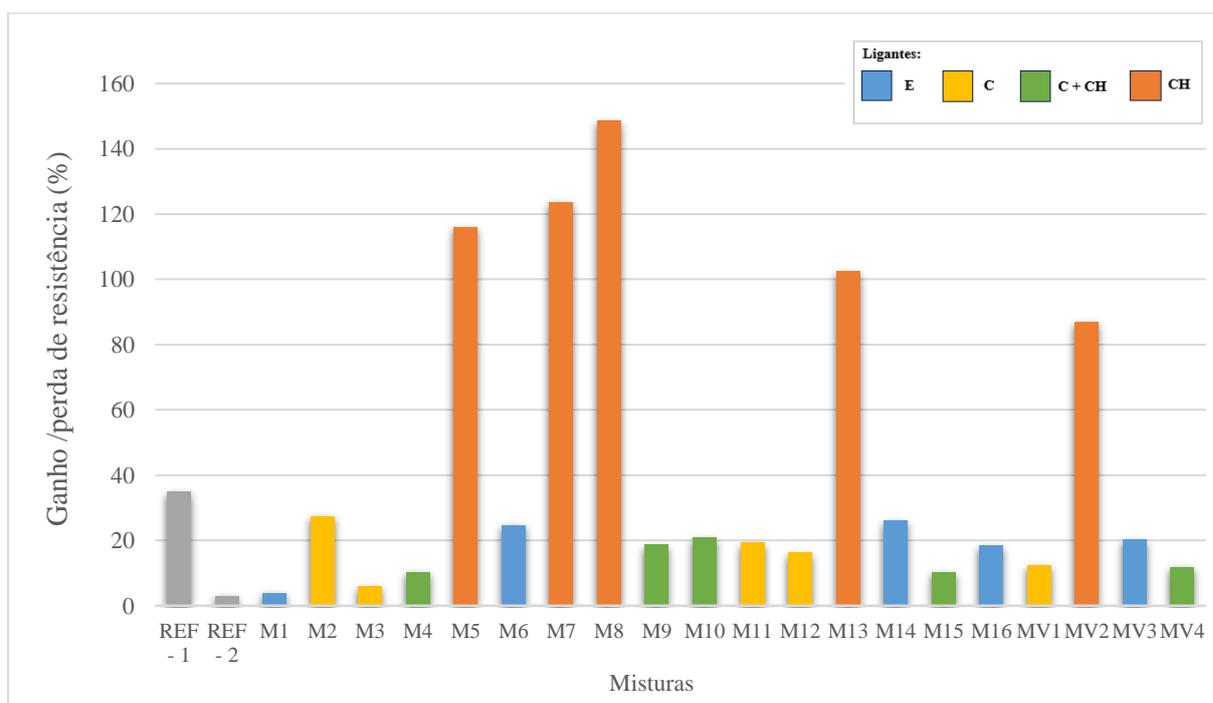


Figura 4.5 - Comparação dos ganhos de resistência nos ensaios à compressão entre os 7 e os 28 dias de cura

De forma análoga ao que foi analisado para os ensaios à flexão, a Tabela 4.3 apresenta a variação da resistência à compressão das diferentes misturas em comparação com a mistura de referência REF-1, nos períodos de 7 e 28 dias, considerando diversos fatores, entre os quais, o tipo de ligante, o traço e a quantidade de substituição de RCP.

Tabela 4.3 - Variação da resistência à compressão (%) das diversas misturas comparativamente com a mistura REF-1 para os 7 e 28 dias

Misturas	Substituição de RCP (%)	Traço	Tipo de ligante	7 dias	28 dias
				$\frac{f_{ct}}{f_{cREF1}}$ (%)	$\frac{f_{ct}}{f_{cREF1}}$ (%)
REF - 1	0	1:2.5	Cimento	-	-
REF - 2	0	1:2.5	Cimento	70,4	30,0
M1	5	1:2.5	Escórias	-79,6	-84,3
M2	5	1:2.5	Cimento	-5,6	-10,8
M3	30	1:2.5	Cimento	-58,4	-67,3
M4	5	1:5.0	Cimento + cal hidráulica	-69,1	-74,7
M5	30	1:2.5	Cal hidráulica	-96,0	-93,7
M6	17,5	1:3.75	Escórias	-80,1	-81,6
M7	5	1:2.5	Cal hidráulica	-94,0	-90,1
M8	30	1:5.0	Cal hidráulica	-96,8	-94,1
M9	30	1:2.5	Cimento + cal hidráulica	-63,3	-67,7
M10	30	1:2.5	Cimento + cal hidráulica	-65,9	-69,5
M11	30	1:5.0	Cimento	-48,5	-54,5
M12	5	1:5.0	Cimento	-28,2	-38,1
M13	5	1:5.0	Cal hidráulica	-96,6	-95,0
M14	17,5	1:3.75	Escórias	-81,0	-82,2
M15	5	1:5.0	Cimento + cal hidráulica	-65,6	-71,9
M16	30	1:5.0	Escórias	-88,5	-89,9
MV1	10	1:3.0	Cimento	8,2	-9,8
MV2	20	1:3.0	Cal hidráulica	-94,7	-92,7
MV3	20	1:4.0	Escórias	-84,1	-85,9
MV4	25	1:4.5	Cimento + cal hidráulica	-73,4	-77,9

Considerando a tabela anterior, é possível constatar que as misturas M2 e MV1 apresentaram resultados de resistência à compressão muito próximos dos valores de referência, tal como ocorreu para os ensaios de flexão. A mistura MV1 demonstrou, novamente, resultados superiores à mistura REF-1, com um aumento de aproximadamente 8% aos 7 dias de cura, embora tenha havido um decréscimo dessa resistência na ordem dos 10% aos 28 dias, enquanto a mistura M2 apresentou valores ligeiramente inferiores, com reduções de cerca de 5% e 10% aos 7 e 28 dias de cura, respetivamente.

Portanto, é válido afirmar que as misturas que utilizam uma substituição de cimento entre 5% e 10% de RCP por ligante de cimento, são capazes de proporcionar resistências semelhantes às argamassas de referência, para o ensaio em questão.

4.2.3. Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 4.1 são exibidos os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (MPa) obtidos nos ensaios para cada uma das misturas realizadas. De forma análoga à abordagem adotada nos ensaios antecedentes, a tabela anterior engloba os valores médios obtidos nos períodos de cura de 7, 17.5 e 28 dias. Para todas as misturas, com exceção das misturas M17, M18, M19 e M20, foram considerados os resultados correspondentes aos períodos de cura de 7 e de 28 dias.

Na Figura 4.6 são ilustrados os resultados apresentados na tabela anterior.

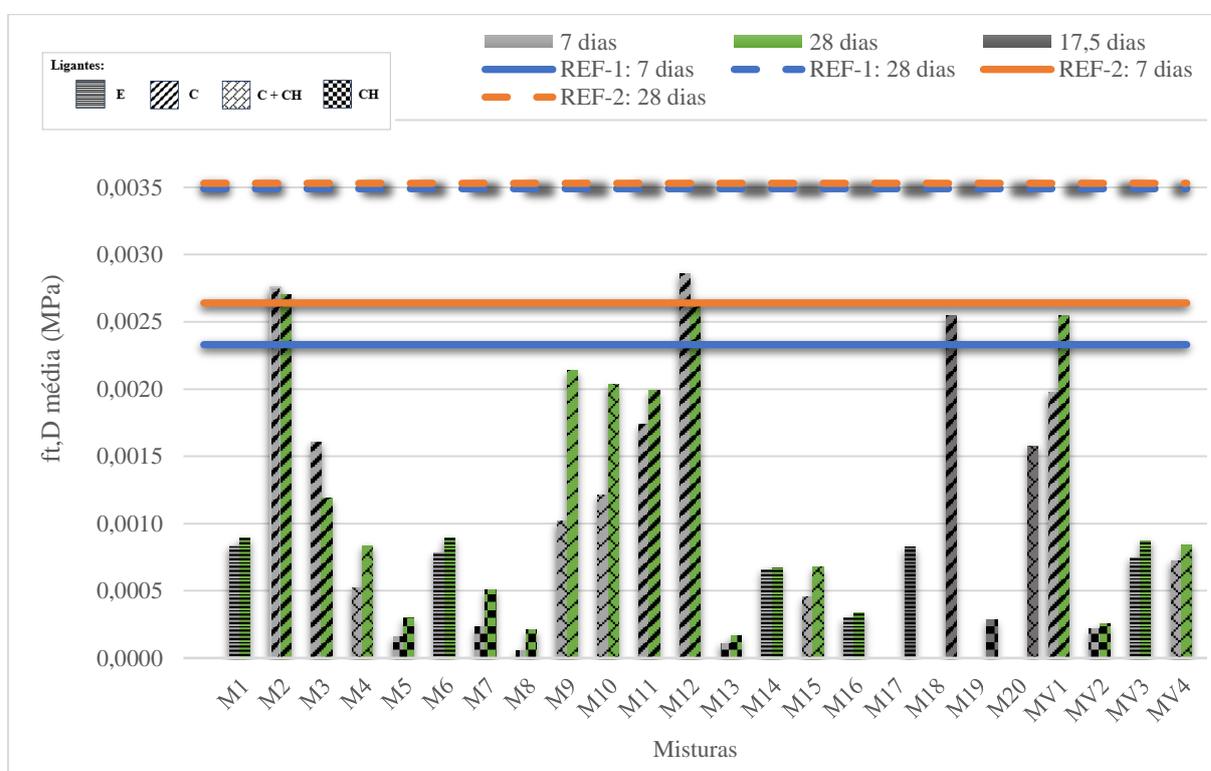


Figura 4.6 - Resistência mecânica à tração por compressão diametral aos 7, 17.5 e 28 dias de cura

Uma vez considerada a figura anterior, verificou-se que em algumas das misturas, mais especificamente nas misturas M2, M3 e M12, a resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias foi superior à dos de 28 dias. Teoricamente, os resultados obtidos para estas misturas não são coerentes, uma vez que é esperado que a resistência amplifique com o aumento do tempo de cura dos provetes. Uma possível explicação para esta incoerência está relacionada com o facto de este tipo de ensaios ser conhecido por serem bastante irregulares em termos de

resultados, comparativamente com os ensaios à flexão e compressão, que oferecem resultados mais fidedignos. Outra causa possível, poderá estar relacionada com a confeção dos provetes ensaiados, uma vez que para a confeção destes, por vezes foi utilizada argamassa do fundo do recipiente, resultado assim, numa menor homogeneidade em relação à argamassa da parte superior, consequência de um menor teor de ligante e consequentemente numa menor resistência. Com base nos resultados obtidos, observou-se que as misturas compostas por cimento apresentaram o melhor desempenho em termos de resistência máxima, seguidas pelas misturas contendo ligante de cimento e cal hidráulica. Em terceiro lugar, as misturas compostas por escórias apresentaram um desempenho inferior, e, por último, as misturas compostas por cal hidráulica. Ao analisar a Figura 4.6, é evidente que as misturas que contêm ligante de cimento obtiveram os melhores resultados em termos de aumento de resistência no tempo, entre 7 e 28 dias de cura. No entanto, essas misturas apresentaram ganhos de resistência relativamente menores, cerca de 1% em média, entre 7 e 28 dias de cura, comparativamente com as outras misturas. Em alguns casos, até ocorreu uma diminuição da resistência, conforme explicado anteriormente. Quanto às misturas compostas por ligante de escórias, também não houve uma diferença de resistência significativa, cerca de 10%. No entanto, as misturas compostas por cimento e cal hidráulica, assim como as misturas contendo apenas cal hidráulica, apresentaram ganhos de resistência substanciais, cerca de 70% e 100% em média, respetivamente.

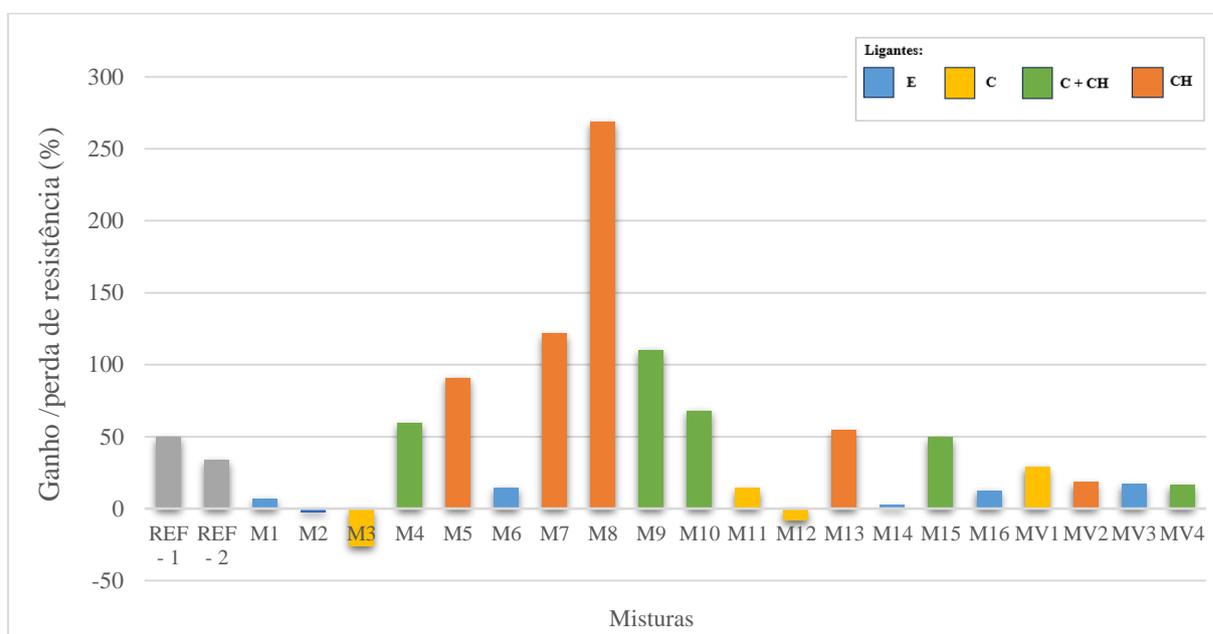


Figura 4.7 - Comparação dos ganhos de resistência nos ensaios à compressão diametral entre os 7 e os 28 dias de cura

Similarmente à análise realizada nos ensaios anteriores, a Tabela 4.4 apresenta a variação da resistência à compressão diametral das diversas misturas em relação à mistura de referência REF-1, nos períodos de cura de 7 e 28 dias.

Tabela 4.4 - Variação da resistência à compressão diametral (%) das diversas misturas comparativamente com a mistura REF-1 para os 7 e 28 dias

Misturas	Substituição de RCP (%)	Traço	Tipo de ligante	7 dias	28 dias
				$\frac{f_{t,D i}}{f_{t,D REF 1}}$ (%)	$\frac{f_{t,D i}}{f_{t,D REF 1}}$ (%)
REF - 1	0	1:2.5	Cimento	-	-
REF - 2	0	1:2.5	Cimento	13,4	1,2
M1	5	1:2.5	Escórias	-64,2	-74,5
M2	5	1:2.5	Cimento	18,3	-22,5
M3	30	1:2.5	Cimento	-31,0	-65,9
M4	5	1:5.0	Cimento + cal hidráulica	-77,5	-75,9
M5	30	1:2.5	Cal hidráulica	-93,3	-91,5
M6	17,5	1:3.75	Escórias	-66,4	-74,4
M7	5	1:2.5	Cal hidráulica	-90,1	-85,4
M8	30	1:5.0	Cal hidráulica	-97,6	-94,0
M9	30	1:2.5	Cimento + cal hidráulica	-56,3	-38,7
M10	30	1:2.5	Cimento + cal hidráulica	-47,9	-41,7
M11	30	1:5.0	Cimento	-25,2	-42,9
M12	5	1:5.0	Cimento	22,7	-24,7
M13	5	1:5.0	Cal hidráulica	-95,3	-95,2
M14	17,5	1:3.75	Escórias	-71,9	-80,7
M15	5	1:5.0	Cimento + cal hidráulica	-80,6	-80,6
M16	30	1:5.0	Escórias	-87,2	-90,4
MV1	10	1:3.0	Cimento	-15,0	-26,9
MV2	20	1:3.0	Cal hidráulica	-90,8	-92,7
MV3	20	1:4.0	Escórias	-67,9	-74,9
MV4	25	1:4.5	Cimento + cal hidráulica	-69,0	-75,9

Considerando a tabela anterior, é possível observar que as misturas M2 e MV1 apresentaram resultados de resistência à compressão algo próximos dos valores de referência, assim como nos outros ensaios. A mistura M2 mostrou, novamente, resultados superiores à mistura REF-1, com um aumento de aproximadamente 18% aos 7 dias de cura. No entanto, aos 28 dias de cura, o seu desempenho foi inferior ao da mistura de referência. A mistura MV1 exibe valores de resistência ligeiramente inferiores à mistura REF-1, quer aos 7, quer aos 28 dias de cura.

Deste modo, é possível afirmar que as misturas que fazem substituição de cimento entre 5% e 10%, são capazes de fornecer resistências algo semelhantes às argamassas de referência nos primeiros dias de cura. No entanto, ao longo desse período, existe uma estagnação da resistência.

4.2.4. Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (PUNDIT)

Os resultados médios dos ensaios de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas das diversas argamassas após um tempo de cura de 28 dias são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas (m/s)

Mistura	Substituição de RCP (%)	Traço	Tipo de ligante	Velocidade média (m/s)
REF - 1	0	1:2,5	C	3626,9
REF - 2	0	1:2,5	C	4143,0
M1	5	1:1,25	E	3306,2
M2	5	1:1,25	C	3990,9
M3	30	1:1,25	C	3498,7
M4=M15	5	1:1,5	C+CH	2776,7
M5	30	1:1,25	CH	2570,0
M6=M14	17,5	1:1,375	E	2862,1
M7	5	1:1,25	CH	2988,1
M8	30	1:1,5	CH	1929,4
M9	30	1:1,25	C+CH	2818,4
M10	30	1:1,25	C+CH	3034,1
M11	30	1:1,5	C	1717,8
M12	5	1:1,5	C	2421,3
M13	5	1:1,5	CH	2412,0
M14=M6	17,5	1:1,375	E	2744,3
M15=M4	5	1:1,5	C+CH	2728,1
M16	30	1:1,5	E	2261,8
M17	17,5	1:3,75	E	3051,6
M18	17,5	1:3,75	C	3379,2
M19	17,5	1:3,75	CH	2183,4
M20	17,5	1:3,75	C+CH	3220,5
MV1	10	1:3,0	C	3516,6
MV2	20	1:3,0	CH	1968,1
MV3	20	1:4,0	E	2345,8
MV4	25	1:4,5	C+CH	2601,3

Foram ensaiados um total de 2 provetes por cada uma das argamassas pelo método direto, em que, a partir do tempo de propagação (μs) e altura média (mm) desses provetes, foi possível determinar a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. Esta velocidade está diretamente relacionada a resistência mecânica de cada uma das argamassas desenvolvidas, sendo, quanto maior for a velocidade de propagação maior será a resistência mecânica. Deste modo, é possível avaliar o estado de compacidade das argamassas, a quantidade de vazios bem como o seu estado de degradação interior.

Com recurso aos valores obtidos e apresentados na Tabela 4.7, foi possível esquematizar na Figura 4.8 as respetivas velocidades médias para cada uma das misturas

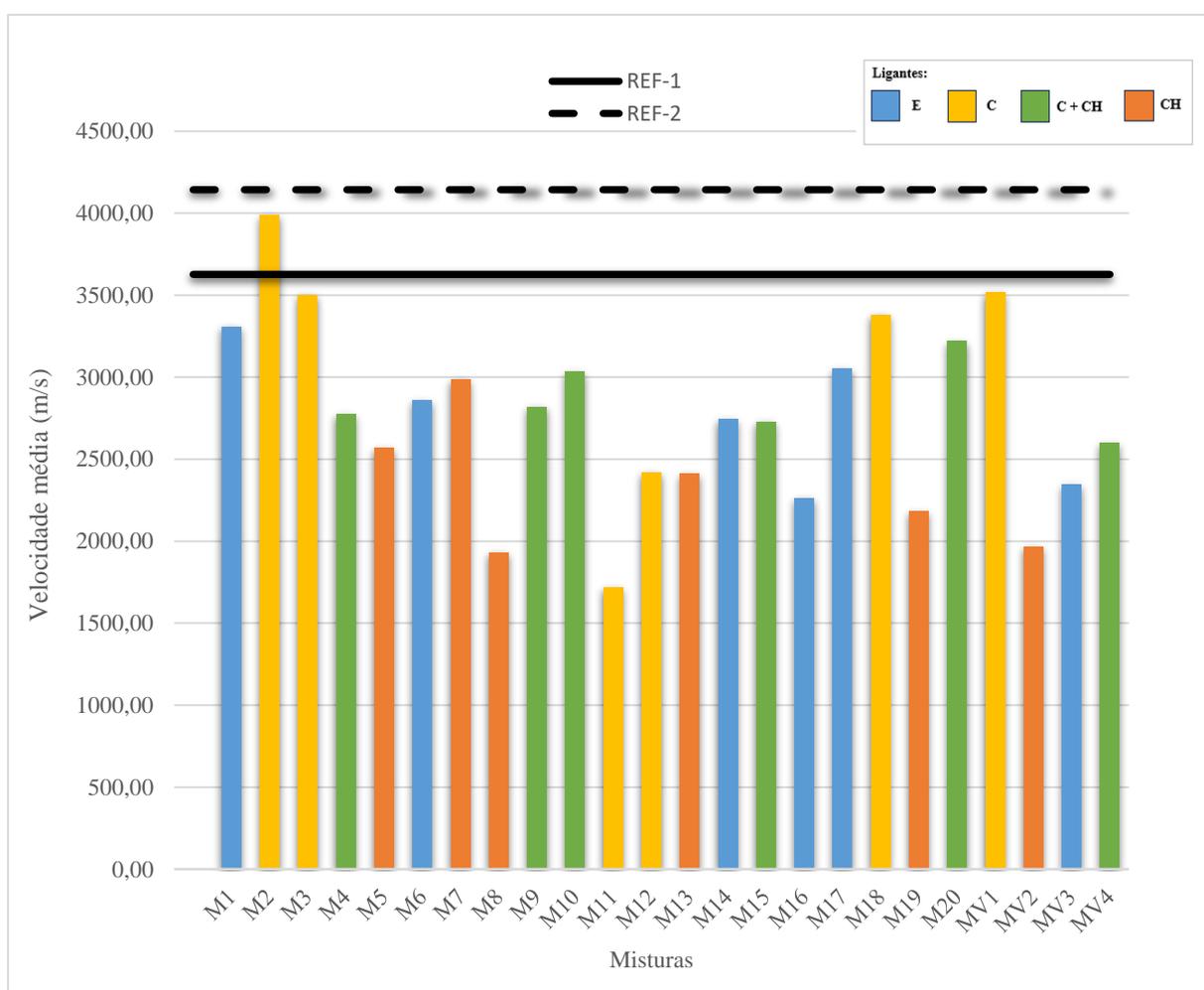


Figura 4.8 - Velocidades médias de propagação de ondas ultrassónicas para as diversas misturas (28 dias de cura)

Com base na figura anterior, é possível observar que os valores médios da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas variam consoante o tipo de ligante utilizado, a percentagem de substituição de RCP bem como o respetivo traço, como será possível analisar com mais detalhe posteriormente, velocidades essas que variam entre aproximadamente 1718 e 3991 m/s (excluindo as misturas de referência).

No contexto do desempenho global das argamassas, aquelas que obtiveram melhor desempenho foram as misturas com ligante de cimento, com uma velocidade média de 3087,47 m/s e uma velocidade máxima de 3990,92 m/s obtida para a mistura M2. Em segundo lugar, estão as misturas que combinam ligante de cimento e cal hidráulica simultaneamente, com uma velocidade média de 2791,78 m/s e uma velocidade máxima obtida de 3220,59 m/s para a mistura M20. Em terceiro lugar, estão as misturas com ligante de escórias, que apresentaram um desempenho muito similar às misturas anteriores, com uma velocidade média ligeiramente inferior, correspondendo a 2762,01 m/s, e uma velocidade máxima de 3306,21 m/s para a mistura M1. Por último, as misturas com ligante de cal hidráulica obtiveram um desempenho inferior, tanto em termos de velocidades médias (2327,85 m/s), quanto em termos de velocidade máxima, 2988,17 m/s para a mistura M7.

Em seguida, será realizada uma análise mais detalhada, focada especificamente na comparação das velocidades obtidas para as misturas com traços iguais

A análise das misturas com traço 1:2.5, conforme ilustrado na Figura 4.9, revela os desempenhos obtidos para cada uma delas. Ao considerar os valores médios, é possível observar que as misturas com ligante de cimento apresentam os melhores comportamentos. Em contrapartida, a mistura que contém escórias demonstrou um desempenho superior quando comparada às misturas contendo cimento e cal hidráulica.

Outro aspeto interessante é que os valores médios da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas tende a baixar com o aumento da percentagem de substituição de RCP, quer para as misturas que usam como ligante o cimento, quer cal hidráulica. Tal pode ser explicado pelo facto de o ligante (seja cimento ou cal hidráulica) quando usado em maiores quantidades (menor incorporação de RCP) proporciona provetes mais homogéneos, logo, com maiores velocidades.

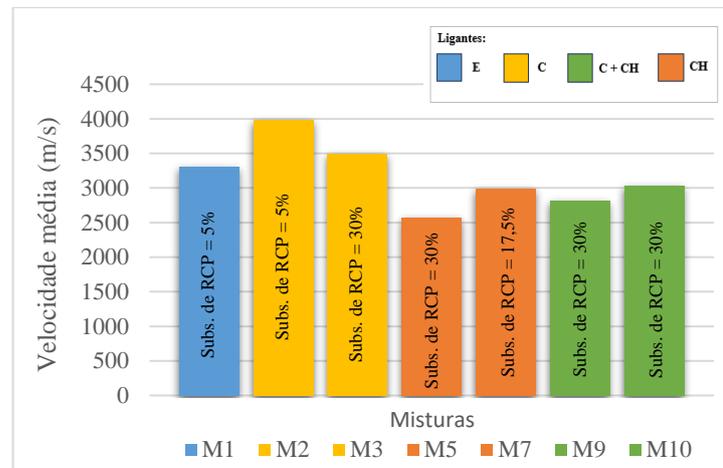


Figura 4.9 - Comparação das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas médias obtidas para misturas com traço 1:2.5

A respeito das misturas com traço 1:3.75, todas produzidas com igual substituição de cimento por RCP de 17,5%, é possível observar os respectivos desempenhos para cada uma delas na Figura 4.10. Novamente, considerando os valores médios, constatou-se que a mistura com ligante de cimento apresentou o melhor comportamento em termos de velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas. Por outro lado, ao contrário do ocorrido para as misturas com traço 1:2.5, as misturas que contêm ligante de cimento e cal hidráulica simultaneamente obtiveram um desempenho superior em comparação com as misturas com escórias. Por fim, e com uma maior discrepância de resultados, a mistura com cal hidráulica demonstrou o pior desempenho.

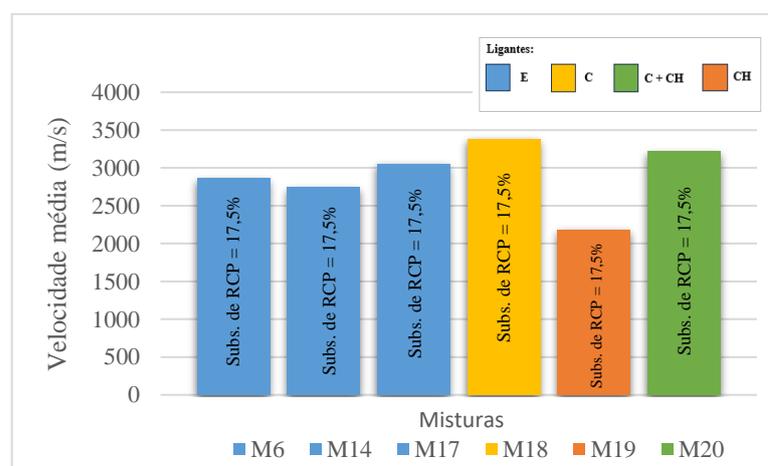


Figura 4.10 - Comparação das velocidades médias de propagação de ondas ultrassônicas obtidas para misturas com traço 1:3.75

No que diz respeito às misturas com traço 1:5, os respetivos desempenhos foram bastante distintos quando comparados com os casos anteriores, como é possível constatar na Figura 4.11. Para este caso concreto, as misturas que contêm ligante de cimento e cal hidráulica simultaneamente obtiveram os melhores resultados. Em relação às demais misturas, é difícil determinar qual delas teve o melhor desempenho. No entanto, considerando a média obtida entre misturas com igual substituição de ligante por 5% de RCP (M12, M13 e M16), verifica-se que a velocidade de propagação de ondas sónicas é bastante similar, independentemente do ligante ser o cimento a cal hidráulica ou escórias, ainda que para este último ligante os resultados sejam ligeiramente inferiores.

Também neste caso se observa que para um dado ligante (seja cimento ou cal hidráulica), a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas tende a baixar com o aumento da percentagem de substituição de RCP

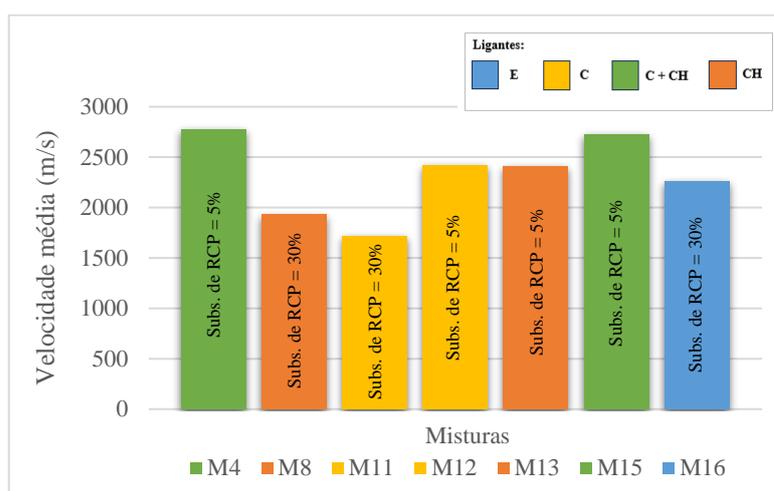


Figura 4.11 - Comparação das velocidades médias de propagação de ondas ultrassónicas obtidas para misturas com traço 1:5

Deste modo, após a análise das três situações, conclui-se que o traço das argamassas desempenha um papel crucial na velocidade de propagação das ondas ultrassónicas e, consequentemente, na resistência e qualidade do material. Verifica-se que, quanto menor for o respetivo traço, maior será a velocidade dessas ondas, e vice-versa.

4.2.5. Ensaio de penetração de cloretos

Durante a execução deste ensaio, surgiram alguns inconvenientes que limitaram a análise apenas às misturas de argamassa com utilização de ligante de cimento e com a combinação simultânea dos ligantes cimento e cal hidráulica. Houve uma grande dificuldade de realizar este ensaio e, conseqüentemente, obter resultados válidos e coerentes com as misturas com ligante de escórias e cal hidráulica, provavelmente devido a uma reação indesejada com a solução de hidróxido de sódio (NaOH) com a qual estava em contacto, o que inviabilizou a conclusão do ensaio.

Os problemas referidos na realização deste ensaio podem ser constatados na Figura 4.12.



Figura 4.12 – a) Possível reação da solução de hidróxido de sódio (NaOH) com as misturas de escórias e cal hidráulica; b) Inexistência da marca de penetração dos cloretos nos provetes das misturas com ligante de cal hidráulica (provetes à esquerda) e escórias (provetes à direita)

No que diz respeito aos resultados válidos, são apresentados na Tabela 4.6 os valores médios das profundidades de penetração dos cloretos para cada mistura de argamassa e o respetivo coeficiente de migração de cloretos, calculado através da expressão (6).

Salienta-se o facto de que, relativamente às misturas M4 e M15 (misturas com a utilização simultânea dos ligantes de cimento e cal hidráulica) não foi possível realizar este ensaio devido à dificuldade em garantir estanquidade entre as soluções de cloreto de sódio (NaCl) e hidróxido de sódio (NaOH). Com o intuito de compreender o problema ocorrido, foi realizado um procedimento para comparar a porosidade da mistura de referência REF-1 com as demais misturas. O objetivo seria verificar se o problema poderia estar relacionado com a alta porosidade dos provetes das respetivas misturas.

Tabela 4.6 – Valor médio da profundidade de penetração (m) e os respectivos coeficientes de migração de cloretos (m²/s)

Mistura	Substituição de RCP (%)	Traço	Tipo de ligante	Valor médio da profundidade de penetração (mm)	Coefficiente de migração de cloretos × 10 ⁻¹² (m ² /s)
REF - 1	0	1:2.5	Cimento	16,188	8,789
REF - 2	0	1:2.5	Cimento	14,266	7,657
M2	5	1:2.5	Cimento	17,762	12,151
M3	30	1:2.5	Cimento	45,677	45,488
M9	30	1:2.5	Cimento + cal hidráulica	45,859	71,495
M10	30	1:2.5	Cimento + cal hidráulica	43,690	67,816
M11	30	1:5.0	Cimento	50,000	36,870
M12	5	1:5.0	Cimento	33,468	19,147
M18	17,5	1:3.75	Cimento	29,948	21,396
M20	17,5	1:3.75	Cimento + cal hidráulica	41,685	20,017
MV1	10	1:3.0	Cimento	26,118	18,471
MV4	25	1:4.5	Cimento + cal hidráulica	40,691	62,742

Como tal, a expressão utilizada para esse estudo foi a seguinte:

$$P = \frac{m_h - m_s}{m_h} [\%] = \frac{\text{água}}{\text{massa Total húmida}} [\%] \quad (7)$$

Em que:

P – Porosidade;

m_h – Massa húmida, em g;

m_s – Massa seca, em g

Inicialmente, os provetes de cada uma das misturas foram removidos da tina de água, conforme ilustrado na Figura 3.15- a), e, em seguida, foram pesados individualmente. Em seguida, os provetes foram colocados numa estufa, onde permaneceram por 4 dias a uma temperatura de 60°C, com o objetivo de remover toda a humidade presente. Após o período de secagem, todos os provetes foram pesados novamente, e, através da expressão anterior, procedeu-se ao cálculo da porosidade média da mistura de referência e das misturas M4 e M15, conforme apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Porosidade média para as misturas REF-1, M4 e M5

Mistura	Massa seca média (%)	Massa húmida média (g)	Porosidade média (%)
REF-1	846,18	876,72	3,483
M4	766,04	831,22	7,841
M15	775,94	839,77	7,601

Ao comparar os resultados obtidos com a mistura de referência, é evidente que as misturas M4 e M15 apresentam uma porosidade significativamente alta, o que justifica a impossibilidade de realizar o ensaio proposto para essas misturas.

Apesar de existirem outras misturas com composições semelhantes, estas duas, para além de terem um traço 1:5 e uma percentagem de substituição de RCP reduzida (5%), são constituídas simultaneamente por ligante de cimento e cal hidráulica, o que por si só, já dificulta garantir a sua estanquidade, ao que acresce o elevado traço (1:5), impossibilitando assim a realização do ensaio de penetração de cloretos.

Conforme mencionado anteriormente, quanto maior for o coeficiente de migração de cloretos, maior será a facilidade do movimento ascendente dos iões, e vice-versa. Este coeficiente está diretamente relacionado com a qualidade das argamassas, de modo que, quanto menor for o seu valor, maior será a qualidade da respetiva argamassa. Através da análise da Figura 4.13 pode-se constatar que, de forma geral, as misturas com ligante de cimento apresentam um coeficiente de migração de cloretos mais baixo em comparação com as restantes misturas, indicando uma melhor qualidade.

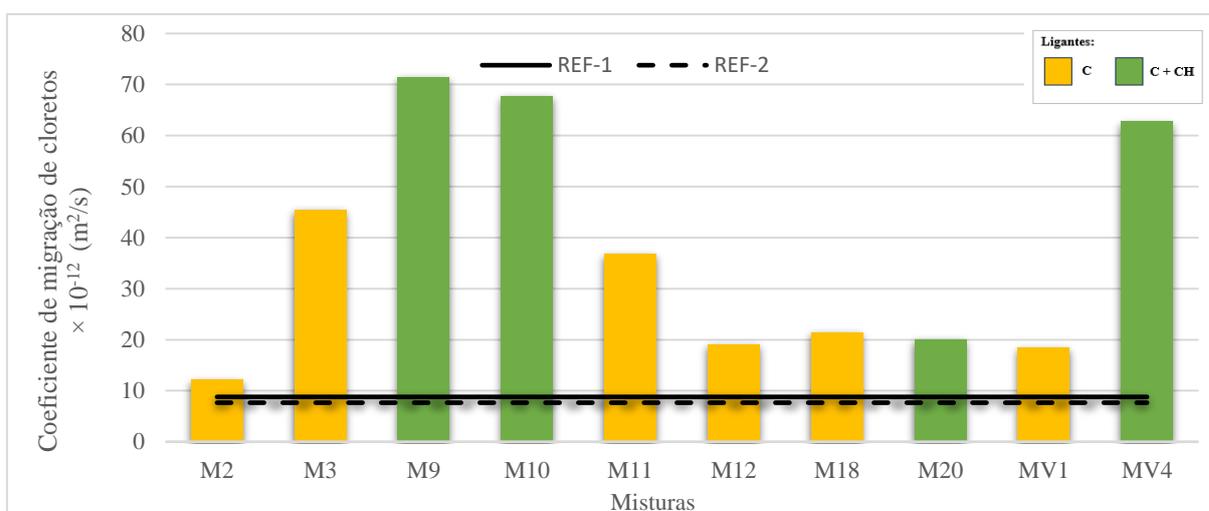


Figura 4.13 - Coeficiente de migração de cloretos (m^2/s)

Observa-se que o traço e o nível de substituição do ligante por RCP nas argamassas exercem uma influência significativa nesse coeficiente. Conclui-se que o coeficiente tende a aumentar conforme ocorre o aumento dessas duas variáveis. Tal é explicado pelo facto de a um maior traço ou maior substituição de ligante por RCP corresponder uma menor quantidade de ligante face ao agregado, conduzindo a uma estrutura mais porosa, logo, com maior coeficiente de migração de cloretos.

5. PREVISÃO DOS RESULTADOS UTILIZANDO A METODOLOGIA DOE

Neste capítulo, no contexto da metodologia DOE (Design of Experiments), mencionada previamente nesta dissertação, foi utilizado o software *JMP Pro 2017* com o objetivo de gerar modelos estatísticos para previsão dos resultados obtidos em cada um dos ensaios realizados, permitindo desta forma estender a previsão de resultados para outras composições, dentro do espaço de dados dos parâmetros analisados. Com o auxílio deste, foi possível avaliar todos os resultados obtidos e realizar uma análise abrangente. Deste modo, torna-se possível compreender de forma mais ampla e detalhada a variação dos resultados com base nas variáveis (parâmetros de entrada) consideradas.

5.1. Considerações iniciais

Inicialmente, será abordado com maior detalhe o modelo de previsão gerado para o ensaio à compressão realizado aos 7 dias e posteriormente aos 28 dias de cura. Será dada uma maior ênfase ao ensaio à compressão, uma vez que é o ensaio mais importante no que diz respeito ao estudo do comportamento mecânico de argamassa. Relativamente aos restantes ensaios, será realizada posteriormente uma análise similar, segundo idêntico procedimento. Para essa análise, foram consideradas apenas as primeiras 16 misturas (M1 à M16), excluindo as restantes misturas, uma vez que, as misturas M17 a M20 foram avaliadas somente após 17,5 dias de cura, o que impossibilita a sua análise aos 7 e 28 dias de cura, enquanto que as misturas MV1 a MV4 são misturas de validação e, portanto, não serão consideradas nesta análise em específico.

5.2. Análise do modelo gerado para o ensaio à compressão aos 7 e 28 dias de cura

Iniciando a análise com base nos resultados obtidos após 7 dias de cura e utilizando o software *JMP Pro 2017*, foi possível obter uma previsão dos valores relativos à resistência à compressão (f_c) para todas as 16 misturas consideradas. Conforme ilustrado na Figura 5.1, é possível visualizar a previsão gerada pelo software mencionado anteriormente, verificando-se que as previsões estão muito próximas dos valores reais medidos, estando todas as previsões dentro dos intervalos de confiança de 95%. Na mesma figura apresentam-se igualmente os efeitos

considerados tendo por base as variáveis (parâmetros de entrada) considerados, bem como os seus efeitos cruzados.

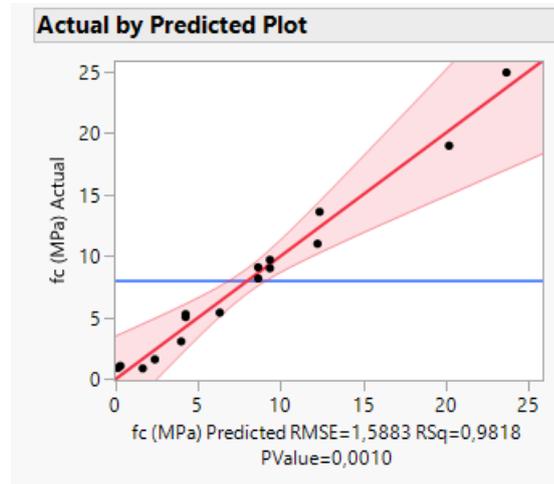


Figura 5.1 – Modelo de previsão para a resistência à compressão aos 7 dias de cura

Com base na Figura anterior e com as informações apresentadas na Figura 5.2-b), é possível concluir que o modelo apresenta uma capacidade de previsão elevada. Os resultados obtidos revelam um erro na estimativa calculado pelo modelo muito baixo, resultando assim, na validade dos resultados globais obtidos.

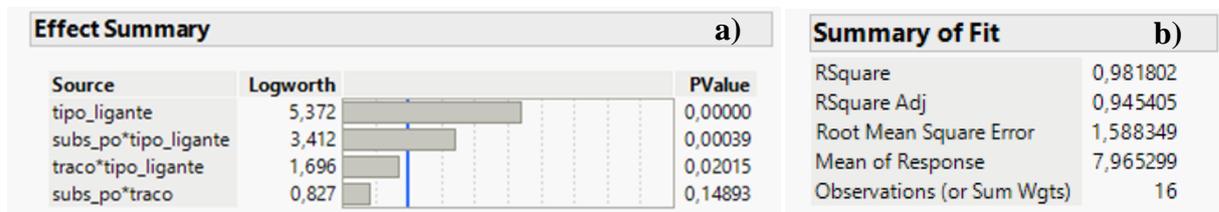


Figura 5.2 – a) Resumo dos efeitos considerados nos modelos de previsão das resistências mecânicas aos 7 dias de cura; b) Informações relativas ao modelo gerado para os 7 dias de cura para o ensaio à compressão

Relativamente ao coeficiente de correlação (R^2), este é um parâmetro que indica a qualidade de ajuste de um modelo, e o seu valor tende a aumentar sempre que for adicionada uma nova amostra/ensaio. No entanto, um problema deste parâmetro é que ele nunca diminui, mesmo quando amostras/ensaios que não sejam significativas são adicionadas. Com o objetivo de corrigir esse efeito, existe o parâmetro coeficiente de correlação ajustado (R^2 ajustado), que tem em consideração uma penalização pela introdução de novas variáveis no modelo. Desta forma, o R^2 ajustado é uma medida mais conservadora da qualidade de ajuste do modelo, pois leva em

consideração o número de amostras/ensaios utilizadas e penaliza o modelo por essa quantidade excessiva e/ou não significativa.

Na Figura 5.3, é apresentado um quadro resumo relativo à análise da variância (ANOVA) do modelo para os 7 dias de cura.

Analysis of Variance				
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	10	680,54391	68,0544	26,9752
Error	5	12,61426	2,5229	Prob > F
C. Total	15	693,15817		0,0010*

Figura 5.3 - Análise da variância (ANOVA) do modelo gerado para os 7 dias de cura

Relativamente ao parâmetro DF (degrees of freedom em graus de liberdade), diz respeito à quantidade de informação contida nos dados de entrada, neste caso, o número de misturas que se considerou para a respetiva análise. Este parâmetro indica a quantidade de dados disponíveis com o objetivo de estimar os parâmetros do modelo, influenciando diretamente na confiabilidade das conclusões obtidas a partir deste. Deste modo, quanto maior for o número de amostras disponíveis, maior será a quantidade de informação fornecida e, conseqüentemente, maior será a precisão do modelo.

O parâmetro F, apresentado na figura anterior, corresponde a uma ferramenta estatística utilizada na análise dos modelos estatísticos gerados, neste caso pelo software *JMP Pro 2017*. O seu principal objetivo diz respeito a avaliar a importância de cada modelo, e, conseqüentemente, avaliar se os efeitos de cada variável independente é estatisticamente significativo. O teste F, é utilizado para verificar se existe uma diferença significativa entre as médias de dois ou mais grupos de uma variável independente. É comparada a variabilidade entre esses grupos com a variabilidade dentro de cada grupo, usando a razão das variâncias. Quanto maior for essa razão, maior será o valor do teste F e mais significativa será a diferença entre os grupos (HOWELL, 2012).

O valor P, que será apresentado na próxima secção, é obtido a partir do teste F, e indica a probabilidade de se obter uma diferença tão grande ou maior que as médias desses grupos, caso a hipótese nula (não há diferença significativa) seja verdadeira. Se o valor P for inferior a um nível de significância pré-determinado (geralmente 5% ou 0,05), rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que há uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos (HOWELL, 2012).

Na Figura 5.4 é apresentada a expressão de previsão da resistência à compressão aos 7 dias de cura gerada pelo software especificamente para este ensaio e para esta idade de cura. Tal como se pode constatar na análise da Figura 5.2-a), os efeitos a considerar pelo modelo são o tipo de ligante (muito significativo), o efeito cruzado tipo de ligante × substituição de RCP (significativo), bem como os efeitos cruzados tipo de ligante × traço e substituição de RCP × traço (pouco significativos). Através desta equação, e considerando os dados introduzidos inicialmente, o software tem a capacidade de prever os resultados obtidos com elevada confiança, tal como o apresentado na Figura 5.1.

Prediction Expression

8,078132234

$$+ \text{Match}(\text{tipo_ligante}) \begin{pmatrix} \text{"C"} & \Rightarrow 9,0525969335 \\ \text{"CH"} & \Rightarrow -6,999225984 \\ \text{"E"} & \Rightarrow -3,859150752 \\ \text{"C+CH"} & \Rightarrow 1,8057798027 \\ \text{else} & \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

$$+ \left(\frac{(\text{subs_po} - 17,5)}{12,5} \right) \cdot \left(\frac{(\text{traco} - 1,375)}{0,125} \right) \cdot 0,9026620367$$

$$+ \left(\frac{(\text{subs_po} - 17,5)}{12,5} \right) \cdot \text{Match}(\text{tipo_ligante}) \begin{pmatrix} \text{"C"} & \Rightarrow -4,836458333 \\ \text{"CH"} & \Rightarrow -0,14453125 \\ \text{"E"} & \Rightarrow 1,1924479175 \\ \text{"C+CH"} & \Rightarrow 3,788541665 \\ \text{else} & \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

$$+ \left(\frac{(\text{traco} - 1,375)}{0,125} \right) \cdot \text{Match}(\text{tipo_ligante}) \begin{pmatrix} \text{"C"} & \Rightarrow -0,840624997 \\ \text{"CH"} & \Rightarrow -0,22265625 \\ \text{"E"} & \Rightarrow -2,365885418 \\ \text{"C+CH"} & \Rightarrow 3,429166665 \\ \text{else} & \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

Figura 5.4 - Expressão que traduz a previsão da resistência à compressão aos 7 dias de cura

Nessa expressão, estão incluídos todas as variáveis (parâmetros de entrada) consideradas no modelo referidas anteriormente e ilustradas na Figura 3.1, mais concretamente os diferentes ligantes utilizados, os respetivos níveis de substituição de RCP bem como os diferentes traços, sendo que, em que cada um deles haverá “pesos” distintos entre eles, como é possível observar.

Conforme discutido para modelo de previsão aos 7 dias, em seguida será analisado o respectivo modelo de previsão aos 28 dias de cura para o ensaio de resistência à compressão, seguindo a mesma abordagem, tal como é ilustrado na Figura 5.5.

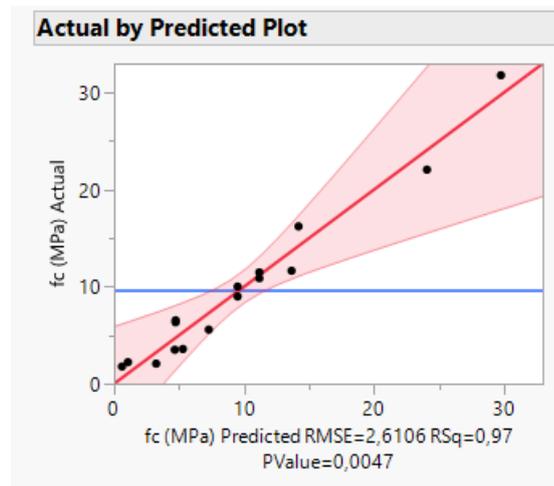


Figura 5.5 - Previsão dos resultados para a resistência à compressão aos 28 dias de cura

Mais uma vez, é importante salientar que o modelo atual possui uma precisão significativa, embora os resultados estimados não apresentem um erro tão baixo quanto o modelo gerado para os 7 dias de cura. No entanto, vale ressaltar que este modelo ainda demonstra uma excelente capacidade de previsão, como pode ser observado na Figura 5.6-b). Embora haja uma ligeira margem de erro, os resultados ainda são altamente confiáveis e indicam uma elevada eficiência do modelo em prever a resistência à compressão aos 28 dias de cura.

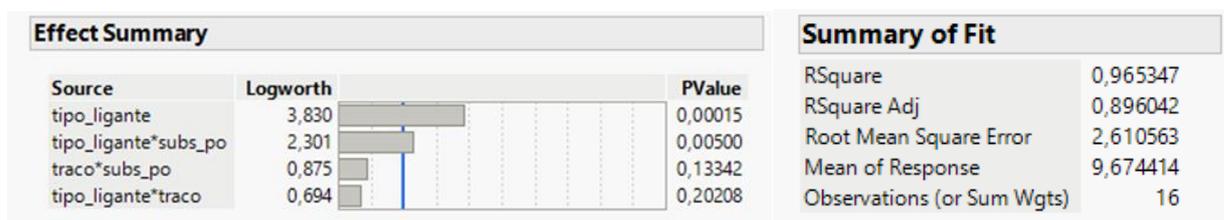


Figura 5.6 – a) Resumo dos efeitos considerados nos modelos de previsão das resistências mecânicas aos 28 dias de cura; b) Informações relativas à reta obtida para o modelo de precisão aos 28 dias de cura para o ensaio à compressão

Na Figura 5.7, é apresentado um quadro resumo relativo à análise da variância (ANOVA) do modelo para os 28 dias de cura.

Analysis of Variance				
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	10	949,26052	94,9261	13,9289
Error	5	34,07519	6,8150	Prob > F
C. Total	15	983,33571		0,0047*

Figura 5.7 -Análise da variância (ANOVA) do modelo gerado para os 28 dias de cura

Da mesma forma que mencionado anteriormente, a seguir é apresentada a expressão que permite prever os resultados da resistência à compressão (Figura 5.8).

Prediction Expression

$$2,6490641276$$

$$+ \text{Match}(\text{tipo_ligante}) \begin{pmatrix} \text{"C"} \Rightarrow 1,9786116536 \\ \text{"CH"} \Rightarrow -1,719650065 \\ \text{"E"} \Rightarrow -0,635301107 \\ \text{"C+CH"} \Rightarrow 0,3763395182 \\ \text{else} \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

$$+ \left(\frac{(\text{subs_po} - 17,5)}{12,5} \right) \cdot \left(\frac{(\text{traco} - 1,375)}{0,125} \right) \cdot 0,2752473958$$

$$+ \text{Match}(\text{tipo_ligante}) \begin{pmatrix} \text{"C"} \Rightarrow \left(\frac{(\text{traco} - 1,375)}{0,125} \right) \cdot -0,302285156 \\ \text{"CH"} \Rightarrow \left(\frac{(\text{traco} - 1,375)}{0,125} \right) \cdot -0,319570312 \\ \text{"E"} \Rightarrow \left(\frac{(\text{traco} - 1,375)}{0,125} \right) \cdot -0,244042969 \\ \text{"C+CH"} \Rightarrow \left(\frac{(\text{traco} - 1,375)}{0,125} \right) \cdot 0,8658984375 \\ \text{else} \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

$$+ \left(\frac{(\text{subs_po} - 17,5)}{12,5} \right) \cdot \text{Match}(\text{tipo_ligante}) \begin{pmatrix} \text{"C"} \Rightarrow -0,791425781 \\ \text{"CH"} \Rightarrow -0,110625 \\ \text{"E"} \Rightarrow -0,128730469 \\ \text{"C+CH"} \Rightarrow 1,03078125 \\ \text{else} \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

Figura 5.8 - Expressão que traduz a previsão da resistência à compressão aos 28 dias de cura

Agora os efeitos considerados pelo modelo como significativos (com valor p inferior a 5%) são o tipo de ligante (muito significativo) e o tipo de ligante × substituição de RCP (significativo). Ainda que pouco significativos, a qualidade do modelo melhora quando se consideram os efeitos de substituição de RCP × traço e tipo de ligante × traço, conforme ilustrado na Figura 5.6-a).

5.3. Análise dos modelos de previsão gerados para os ensaios mecânicos e de durabilidade aos 7 e 28 dias de cura

Concluída a análise mais pormenorizada do modelo gerado pelo software para o ensaio de compressão, em seguida serão apresentados de forma mais resumida os modelos de previsão aplicáveis para todos os ensaios realizados, tanto para os ensaios mecânicos (ensaio à flexão e à compressão diametral), quanto para os ensaios de durabilidade (velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e penetração de cloretos). Esta abordagem permitirá uma compreensão mais ampla das previsões geradas bem como a relação entre cada uma das variáveis consideradas.

5.3.1. Ensaios mecânicos

Começando a análise com os ensaios mecânicos, o primeiro passo consistiu no preenchimento de uma tabela de entrada com os resultados médios de cada uma das resistências para todas as misturas e dias de cura correspondentes, tornando-se possível compreender o impacto de cada uma das variáveis estabelecidas inicialmente, como o tipo de ligante utilizado, a quantidade de substituição de RCP e o traço, na resistência dos materiais. O software permitiu combinar simultaneamente os resultados obtidos e descritos no capítulo anterior, com base nessas variáveis, através da definição de efeitos cruzados, levando às conclusões apresentadas na Figura 5.2-a) e na Figura 5.9, exportadas diretamente do *JMP Pro 2017*.

Summary of Fit		a)	Summary of Fit		b)
RSquare		0,980289	RSquare		0,995504
RSquare Adj		0,940866	RSquare Adj		0,986511
Root Mean Square Error		0,371204	Root Mean Square Error		0,000102
Mean of Response		2,129449	Mean of Response		0,000955
Observations (or Sum Wgts)		16	Observations (or Sum Wgts)		16

Figura 5.9 - Informações relativas à reta obtida para o modelo de previsão gerado para os 7 dias de cura consoante o tipo de ensaio: a) Ensaio à flexão; b) Ensaio à compressão diametral

Como pode ser observado, reafirmando uma constatação anterior, após 7 dias de cura, o tipo de ligante é o fator que exerce a maior influência no que diz respeito às resistências mecânicas. Ao

analisar a interação das variáveis de substituição de RCP e traço com o tipo de ligante, é evidente que ocorre uma diminuição da sua influência nas resistências mecânica, sendo que essa influência é maior na substituição de RCP comparativamente com o traço. Por outro lado, ao cruzar estas duas últimas variáveis, verifica-se que ambas têm uma influência limitada em termos de resistências mecânica. A partir da Figura 5.9, é possível compreender que os modelos gerados aos 7 dias de cura para os ensaios à flexão e compressão diametral apresentam uma capacidade de previsão elevada, uma vez que, o R^2 ajustado apresenta valores superiores a 94% em ambas as situações.

A partir da Figura 5.10, é possível compreender de forma clara a evolução das diversas resistências, à medida que varia o tipo de ligante (C, CH, E e C+CH), a percentagem de substituição do ligante por RCP (de 5% a 30%) e o traço da mistura (de 1:2,5 a 1:5,0).

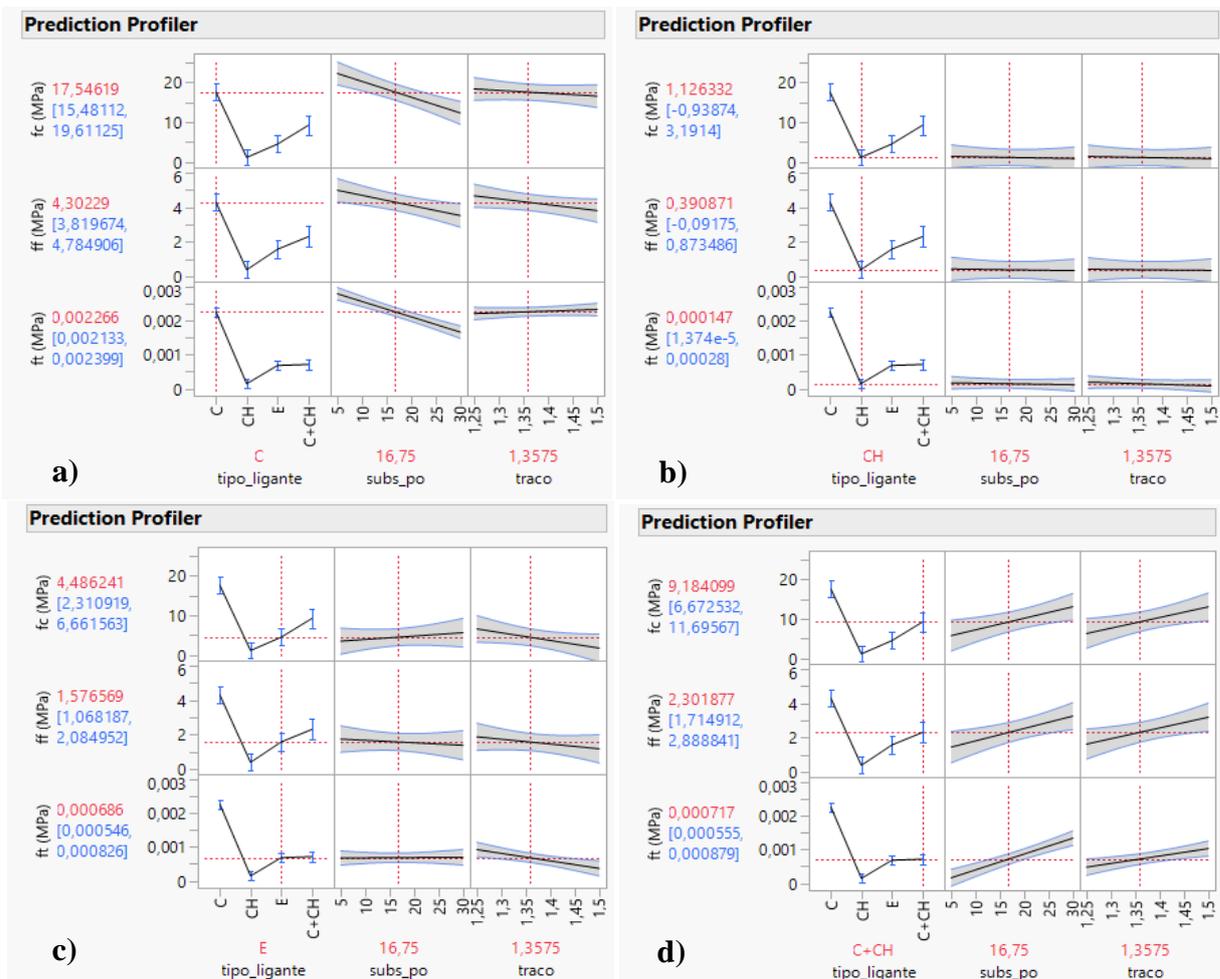


Figura 5.10 - Previsão das respectivas resistências mecânicas (fc, ff e ft) aos 7 dias de cura para os diferentes níveis de substituição de RCP e traços consoante o tipo de ligante: a) Cimento (C); b) Cal hidráulica (CH); Escórias (E); d) Cimento + Cal hidráulica (C+CH)

De forma bastante evidente, as misturas que utilizam ligante de cimento apresentam um desempenho mecânico superior, seguidas pelas misturas que empregam simultaneamente ligantes de cimento e cal hidráulica. Em terceiro lugar estão as misturas com ligante de escórias e, por último, as misturas com ligante de cal hidráulica.

É possível observar que as resistências mecânicas ao fim de 7 de cura não são uniformes e variam consoante as variáveis (parâmetros de entrada) estudadas. No caso das misturas com ligante de cimento, constata-se que a resistência à compressão e flexão tende a diminuir à medida que ocorre maior substituição de RCP e redução do respectivo traço. Por outro lado, a resistência à tração por compressão diametral diminui com o aumento da substituição de RCP, mas tende a aumentar para traços superiores. Relativamente às misturas com ligante de cal hidráulica, observa-se uma tendência semelhante para todos os ensaios, ou seja, as resistências mecânicas não variam significativamente com alterações nos níveis de substituição de RCP ou nos traços correspondentes. As misturas com utilização de escórias como ligante apresentam um comportamento semelhante ao das misturas com ligante de cal hidráulica, embora com uma variação de resistência mecânicas um pouco mais significativa. A resistência à compressão aumenta com o incremento da percentagem de substituição de RCP, enquanto que a resistência à flexão se reduz com o aumento da percentagem de substituição desse RCP e do traço. A resistência à tração por compressão diametral, tende a manter-se constante com a substituição de RCP, mas tende a diminuir com o aumento do traço. Por fim, nas misturas que utilizam ligante de cimento e cal hidráulica simultaneamente, observa-se um aumento de todas as resistências mecânicas com o aumento dos níveis de substituição de RCP e do traço.

Em seguida, será realizada uma análise semelhante à anterior, mas, agora tendo em consideração a previsão do software relativamente às resistências obtidas para os ensaios mecânicos (f_c , f_f e f_t) aos 28 dias de cura. Similarmente à análise anteriormente realizada, entre todas as variáveis (parâmetros de entrada) consideradas, constata-se através da Figura 5.6-a) que o tipo de ligante ainda possui a maior influência nas resistências mecânicas das argamassas após os 28 dias de cura. Novamente, foram cruzadas essas variáveis no software com o intuito de determinar quais teriam maior influência. Neste caso específico, essa influência teve uma ligeira alteração, sendo que a interação entre as variáveis traço e substituição de RCP mostraram ter uma influência maior em comparação com a interação entre as variáveis tipo de ligante e traço. Esta situação é inversa ao observado para a resistência aos 7 dias de cura. Além disso, a influência das variáveis permanece semelhante, embora com pesos diferentes.

Através da Figura 5.11, verifica-se que os modelos gerados aos 28 dias de cura para os ensaios à flexão e compressão diametral apresentam uma excelente capacidade de previsão (R^2 ajustado superior a 95% para os dois ensaios), tal como aconteceu para os modelos gerados aos 7 dias de cura.

Summary of Fit a)		Summary of Fit b)	
RSquare	0,984338	RSquare	0,961173
RSquare Adj	0,953014	RSquare Adj	0,88352
Root Mean Square Error	0,000189	Root Mean Square Error	0,515542
Mean of Response	0,001135	Mean of Response	2,614658
Observations (or Sum Wgts)	16	Observations (or Sum Wgts)	16

Figura 5.11 - Informações relativas à reta obtida para o modelo de previsão gerado para os 28 dias de cura consoante o tipo de ensaio: a) Ensaio à flexão; b) Ensaio à compressão diametral

Na Figura 5.12, à semelhança da apresentada anteriormente, é ilustrada uma previsão das resistências obtidas após 28 dias de cura para cada uma das resistências mecânicas (f_c , f_f e f_t), levando em consideração todas as variáveis (parâmetros de entrada) analisadas.

Relativamente à previsão das resistências obtidas para cada um dos ensaios, considerando todas as variáveis (parâmetros de entrada) abordadas, observa-se que essas resistências evoluem de forma muito semelhante às resistências previstas aos 7 dias de cura. Verifica-se que as misturas que utilizam cimento como ligante apresentam um desempenho superior comparativamente às demais. Em seguida, estão das misturas que utilizam simultaneamente cimento e cal hidráulica como ligantes, seguidas pelas misturas com ligante de escórias. Por fim, as misturas com ligante de cal hidráulica apresentam o pior desempenho.

No que diz respeito à evolução das resistências mecânicas, à medida que são alterados os valores das respetivas variáveis (parâmetros de entrada), verifica-se que é praticamente idêntica ao observado para as resistências aos 7 dias de cura, com apenas ligeiras diferenças.

Com base nos resultados obtidos e analisados os modelos de previsão gerados pelo software para as resistências mecânicas, é possível afirmar de forma sólida e confiável, que esses modelos apresentam uma elevada precisão, podendo ser utilizados com segurança na tomada de decisões com vista à definição otimizada das composições das argamassas.

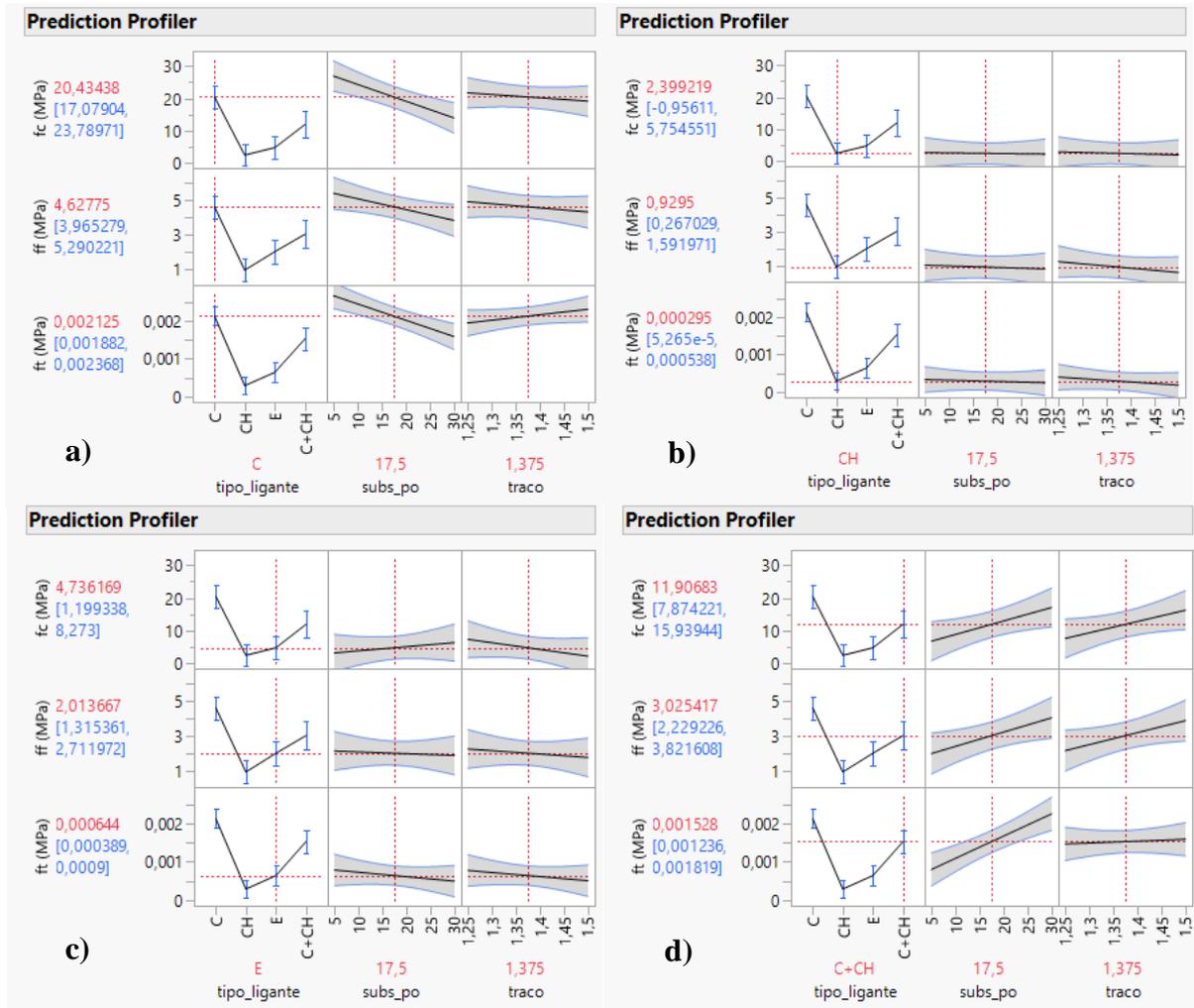


Figura 5.12 - Previsão das respectivas resistências mecânicas (fc, ff e ft) aos 28 dias de cura para os diferentes níveis de substituição de RCP e traços consoante o tipo de ligante: a) Cimento (C); b) Cal hidráulica (CH); Escórias (E); d) Cimento + Cal hidráulica (C+CH)

5.3.2. Ensaios de durabilidade

Nesta secção, ao contrário da anterior, será realizada uma análise individual para cada um dos ensaios. Conforme mencionado anteriormente, para o ensaio de penetração de cloretos, apenas foram consideradas as misturas com ligantes de cimento com cal hidráulica em simultâneo. Por outro lado, todas as 16 misturas foram consideradas para o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. No entanto, o software *JMP Pro 2017* não tem a capacidade de gerar nenhum modelo de previsão em comum para os dois ensaios. Seria necessário preencher a mesma tabela com os resultados obtidos para todas as misturas, assim como foi feito para os ensaios mecânicos. Outro aspeto a salientar, deve-se ao facto de que a análise a estes ensaios é

relativa apenas aos 28 dias de cura, ao contrário dos ensaios mecânicos, que abrangem as duas idades de cura.

Dessa forma, para dar início à análise do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, o primeiro passo consistiu em preencher a tabela do software com os valores médios obtidos neste ensaio para cada uma das misturas correspondentes. Em seguida, definiram-se os efeitos a considerar tendo por base as variáveis iniciais (parâmetros de entrada), e seus efeitos cruzados. A Figura 5.13 resume a influência de cada um dos efeitos e os seus pesos relativos.

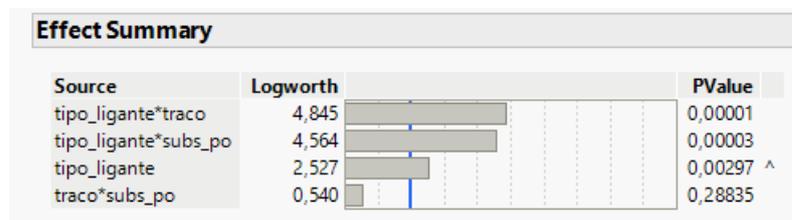


Figura 5.13 - Resumo dos efeitos considerados no modelo de previsão da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas aos 28 dias de cura

Ao contrário do que foi observado para os ensaios mecânicos, no caso da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, o efeito relativo ao tipo de ligante de forma isolada não é o fator com maior influência no desempenho das argamassas desenvolvidas, mas sim os efeitos cruzados tipo de ligante × traço e tipo de ligante × substituição de RCP, sendo que entre estes dois efeitos, o traço tem uma influência ligeiramente superior. Através da Figura 5.14, facilmente se compreende que o modelo gerado para o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é extremamente robusto, apresentando um R^2 ajustado com cerca de 98%.

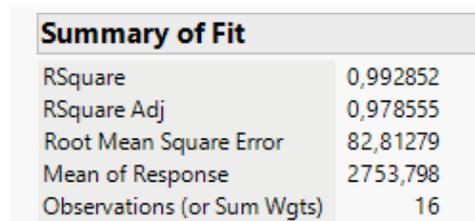


Figura 5.14 - Informações relativas à reta obtida para o modelo de precisão aos 28 dias de cura para o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Através da Figura 5.15, é possível observar como a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (v_p) varia de acordo com o tipo de ligante (C, CH, E e C+CH), a percentagem de substituição do ligante por RCP (de 5% a 30%) e o traço da mistura (de 1:2.5 a 1:5.0).

Como supramencionado, quanto maior a velocidade obtida, melhor será a qualidade do material e, conseqüentemente, maior será a sua resistência.

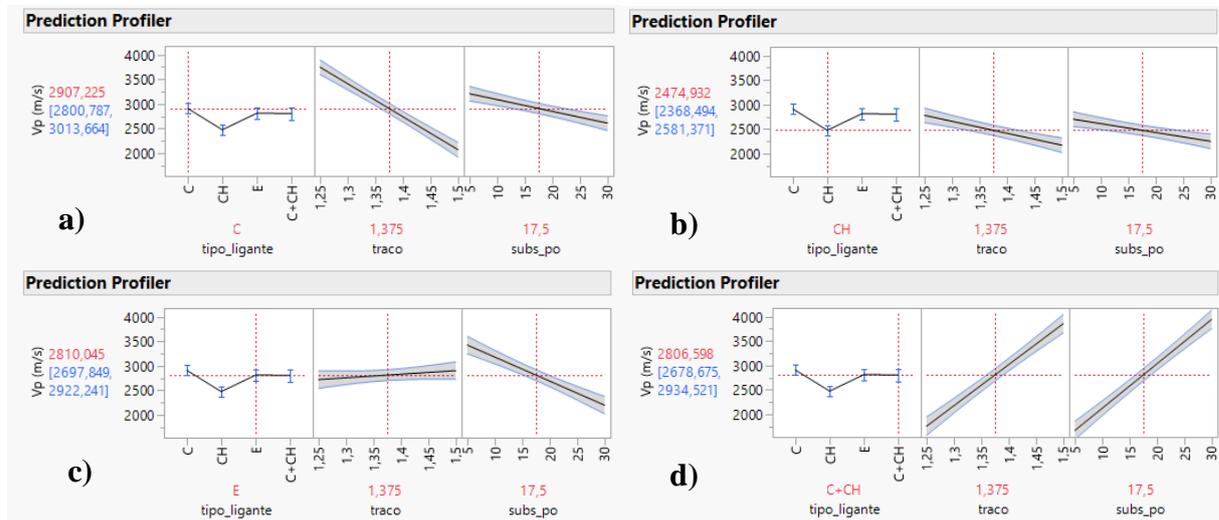


Figura 5.15 - Previsão da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas aos 28 dias de cura para os diferentes níveis de substituição de RCP e traços consoante o tipo de ligante: a) Cimento (C); b) Cal hidráulica (CH); Escórias (E); d) Cimento + Cal hidráulica (C+CH)

Podemos verificar que não existem diferenças significativas no desempenho entre as misturas que utilizam ligante de cimento e cal hidráulica. No entanto, as misturas com ligante de cimento demonstram um desempenho ligeiramente superior, seguidas pelas misturas com escórias, e em terceiro lugar, as misturas com ligantes de cimento e cal hidráulica combinados. As misturas que utilizam apenas cal hidráulica como ligante, apresentam novamente o pior desempenho.

As misturas que utilizam diferentes ligantes apresentam variações distintas quando as variáveis (parâmetros de entrada) são modificadas. No caso das misturas com ligante de cimento, observa-se que a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas diminui à medida que o traço e a substituição de RCP aumentam. No entanto, o traço exerce uma influência maior nessa variação, conforme ilustrado na Figura 5.13. No caso das misturas com ligante de cal hidráulica, apresentam uma variação de desempenho muito semelhante às misturas com ligante de cimento, embora essa diminuição não seja tão acentuada. Já as misturas com ligante de escórias têm um comportamento completamente diferente. Neste caso, ocorre um ligeiro aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas à medida que o traço aumenta. No entanto, à medida que a substituição de RCP aumenta, há uma perda de desempenho dessas misturas. Por fim, as misturas que utilizam simultaneamente os ligantes de cimento e cal hidráulica demonstram um aumento significativo de desempenho à medida que o traço e a substituição de RCP também aumentam.

Relativamente ao modelo gerado para o coeficiente de migração de cloretos, é importante salientar que a sua capacidade de previsão não é tão eficaz em comparação com os modelos anteriores. Isso deve-se aos inconvenientes enfrentados durante a realização dos ensaios com as misturas com ligantes de escórias e cal hidráulica, conforme mencionado no capítulo anterior. Portanto, foi possível considerar apenas as misturas com ligante de cimento e cimento com cal hidráulica simultaneamente. Além disso, como já foi explicado anteriormente, as misturas M4 e M15 não puderam ser incluídas nesta análise devido à sua alta porosidade, o que impossibilitou a realização do ensaio em questão. Por esse motivo, o software considerou apenas 6 das 16 misturas (M2, M3, M9, M10, M11 e M12), e, como tal, é compreensível que a precisão dos resultados seja afetada por essa redução no número de amostras consideradas.

Independentemente do problema ocorrido, proceder-se-á ao desenvolvimento do modelo de previsão do coeficiente de migração de cloretos. Com base na Figura 5.16, é evidente que o efeito com maior influência é o tipo de ligante. No entanto, é importante salientar que a interação dos efeitos tipo de ligante e substituição de RCP, assim como o traço com substituição de RCP, também exercem uma influência significativa no comportamento das argamassas, como foi destacado no capítulo 4.

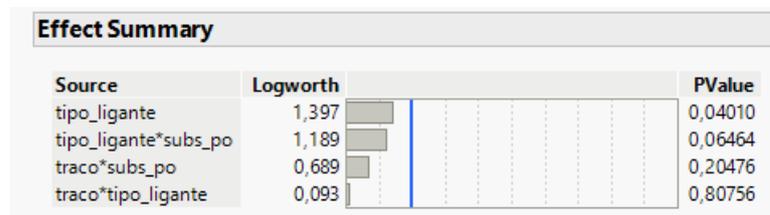


Figura 5.16 - Resumo da influência dos efeitos considerados no modelo de previsão do coeficiente de migração de cloretos aos 28 dias de cura

Posto isto, na Figura 5.17 é apresentada uma tabela exportada diretamente do software que traduz a qualidade da reta obtida para o modelo de previsão aos 28 dias de cura para o ensaio de penetração de cloretos. Depois de devidamente analisada, é possível concluir que, embora tenham sido consideradas um menor número de misturas comparativamente com os modelos gerados para os restantes ensaios, o modelo gerado para o presente ensaio apresenta uma grande capacidade de previsão (R^2 ajustado superior a 98%).

Summary of Fit	
RSquare	0,997735
RSquare Adj	0,988677
Root Mean Square Error	2,601262
Mean of Response	42,16129
Observations (or Sum Wgts)	6

Figura 5.17 - Informações relativas à reta obtida para o modelo de precisão aos 28 dias de cura para o ensaio de penetração de cloretos

De forma similar para os restantes modelos, de seguida será avaliado o comportamento consoante são alterados as variáveis (parâmetros de entrada) consideradas, tal como é ilustrado na Figura 5.18. De forma imediata, percebe-se que as misturas com ligante de cimento apresentam um coeficiente de migração de cloretos inferior ao das misturas com ligante de cimento e cal hidráulica em simultâneo, e, como tal, apresentam, de modo geral, um melhor desempenho.

Ao analisar as misturas com ligante de cimento, observa-se que o traço não possui uma grande influência no coeficiente de migração de cloretos. Isto significa que não há variação significativa nos resultados quando ocorre variação dessa variável. Por outro lado, em relação à substituição de RCP, é possível reparar que o comportamento tende a piorar à medida que essa substituição aumenta. Isso indica que um aumento na taxa de substituição de RCP está associado a um aumento do coeficiente de migração de cloretos e, conseqüentemente, um pior desempenho.

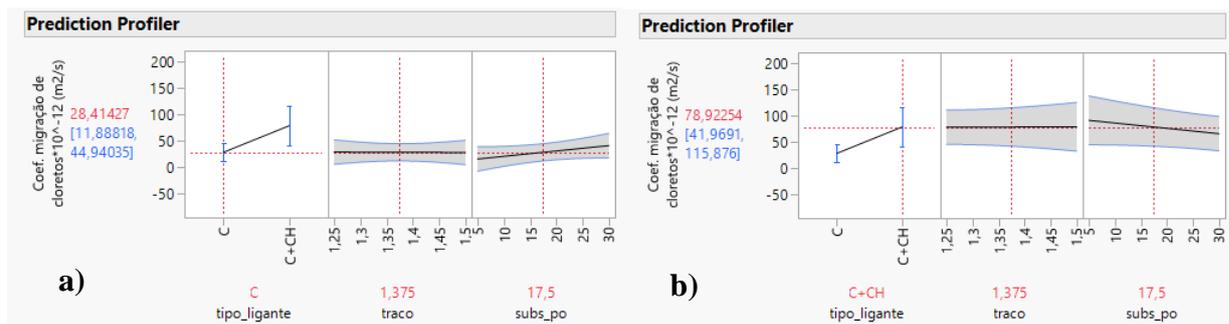


Figura 5.18 - Previsão do coeficiente de migração de cloretos aos 28 dias para os diferentes níveis de substituição de RCP e traços consoante o tipo de ligante: a) Cimento (C); b) Cimento + Cal Hidráulica (C+CH)

No caso das misturas que utilizam simultaneamente os ligantes de cimento e cal hidráulica, verifica-se uma variação maior dos resultados comparativamente com as misturas de cimento, devido ao número restrito de misturas inseridas no software para este tipo de ligante. Apesar disso, pode-se constatar novamente que o traço não exerce uma grande influência no desempenho dessas misturas. Por outro lado, a substituição de RCP apresenta uma influência superior. À medida que a taxa de substituição de RCP aumenta, ocorre uma diminuição do coeficiente de migração de cloretos, indicando um melhor desempenho, e, vice-versa.

Posto isto, tal como aconteceu para os ensaios mecânicos, é possível concluir que os resultados gerados pelos modelos para os ensaios de durabilidade estão em conformidade com os resultados obtidos no capítulo 4, embora não tenha havido uma precisão tão elevada para o coeficiente de migração de cloretos, pela razão previamente referida. Ainda assim, percebe-se que os modelos gerados para os ensaios de durabilidade são robustos e representam de forma eficaz as relações e comportamentos entre as variáveis (parâmetros de entrada) consideradas nos ensaios, proporcionando uma base sólida para análises e conclusões.

5.4. Misturas de validação

Após a análise dos modelos gerados para as misturas avaliadas em cada um dos respectivos ensaios mecânicos e de durabilidade realizados aos 7 e 28 dias de cura, é necessário verificar se os modelos anteriormente apresentados dentro do domínio gráfico ilustrado na Figura 3.1 têm uma boa capacidade de previsão. Como tal, é imperativo considerar as misturas de validação geradas pelo software *JMP Pro 2017* e com base nesses modelos de previsão, perceber se os resultados obtidos em cada ensaio correspondem aos previstos. A avaliação dos resultados obtidos para as misturas de validação é de extrema importância, pois permite determinar se os modelos gerados são precisos, robustos e consistentes. Nesse contexto, serão analisados os resultados obtidos para cada um dos ensaios, aos 7 e 28 dias de cura para os ensaios mecânicos e aos 28 dias de cura para os ensaios de durabilidade

Iniciando com os ensaios mecânicos, especificamente o ensaio de compressão, é possível compreender a previsão dos resultados obtidos para as misturas de validação considerando as diferentes idades de cura, conforme representado na Figura 5.19.

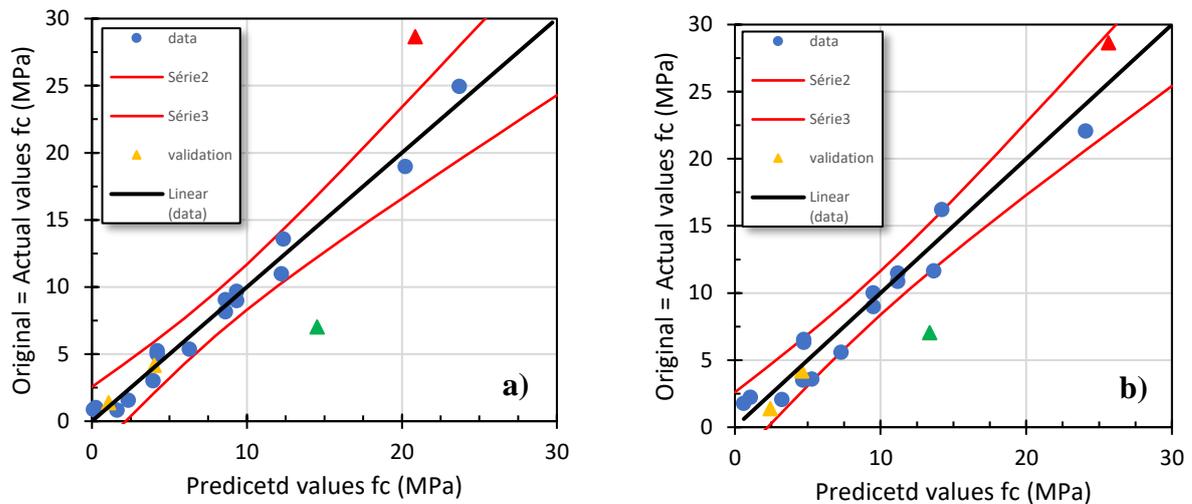


Figura 5.19 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para o ensaio de resistência à compressão para as misturas de validação consoante a idade de cura: a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

No modelo gerado para os 7 dias de cura, observamos que duas das misturas de validação encontram-se dentro do intervalo de confiança de 95%, enquanto as restantes estão ligeiramente fora desse intervalo, embora muito próximas dela. Por outro lado, no modelo correspondente aos 28 dias de cura, constatou-se que três das quatro misturas de validação estão dentro do intervalo de confiança. Isso sugere que o modelo, quer para os 7 dias, quer para os 28 dias de cura, apresenta uma excelente capacidade de previsão dentro do domínio considerado.

Na Figura 5.20, apresentam-se os resultados de previsão obtidos para as misturas de validação consideradas para as diferentes idades de cura, especificamente no ensaio de flexão.

Em semelhança ao analisado para o ensaio anterior, ao avaliar o ensaio de flexão, observamos que os modelos desenvolvidos para as diferentes idades de cura demonstram uma sólida capacidade de previsão. Isso fica evidente, pois umas das misturas de validação encontra-se dentro do intervalo de confiança, enquanto outras duas estão muito próximas desse intervalo. No entanto, verifica-se que uma das misturas está consideravelmente distante do intervalo de confiança de 95%, tanto no modelo gerado para os 7 dias quanto no modelo gerado para os 28 dias de cura.

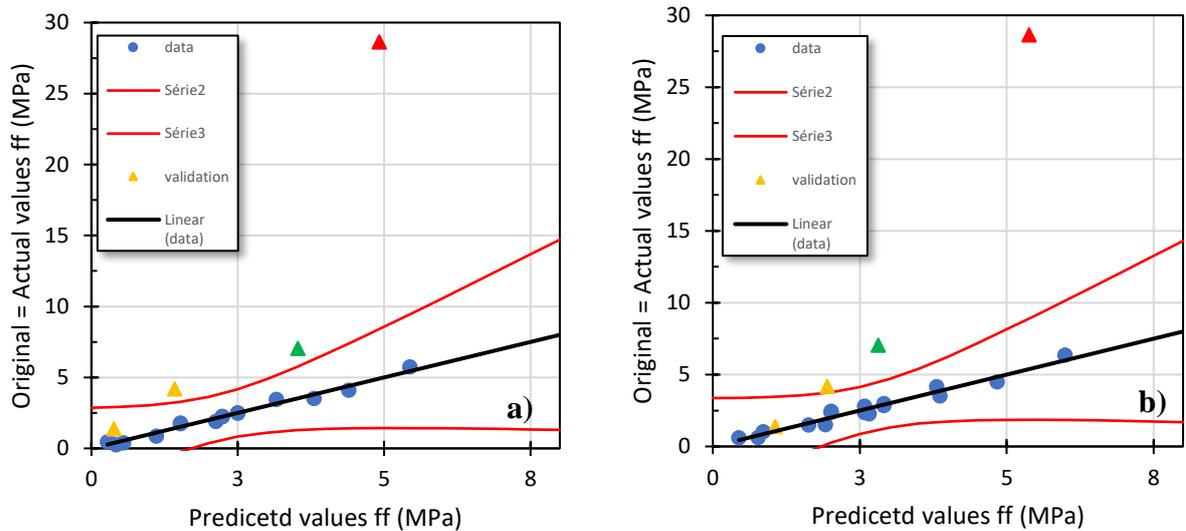


Figura 5.20 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para o ensaio de resistência à flexão para as misturas de validação consoante a idade de cura: a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

No que diz respeito ao ensaio de tração por compressão diametral, é possível inferir através da Figura 5.21 que os resultados de previsão permanecem consistentes com os casos anteriores. Por outras palavras, uma das misturas de validação está dentro do intervalo de confiança de 95%, duas misturas estão próximas desse intervalo e uma das misturas está consideravelmente fora do respetivo intervalo para as duas idades de cura.

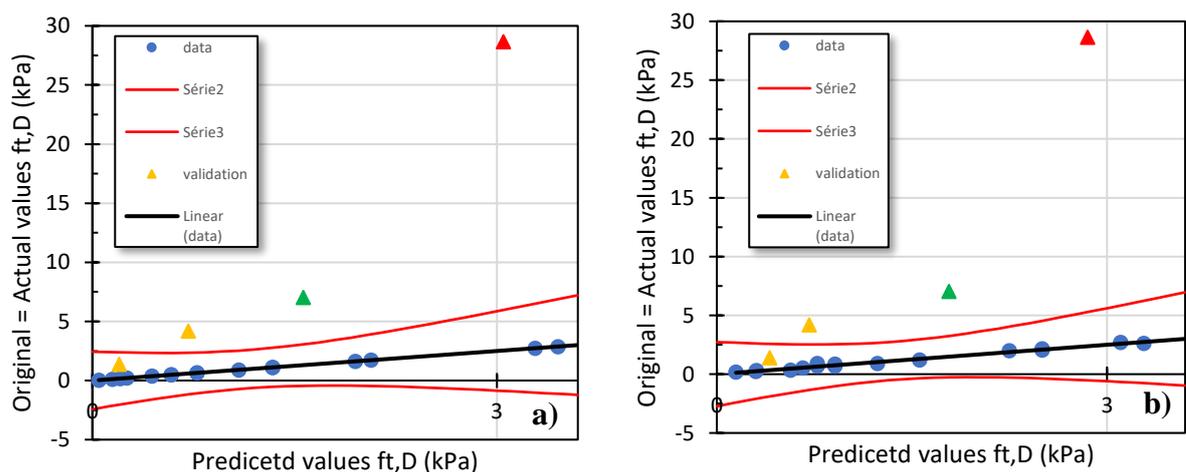


Figura 5.21 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas de validação consoante a idade de cura: a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

Após a análise dos modelos de previsão para os ensaios mecânicos, é agora momento de avaliar os modelos desenvolvidos para os ensaios de durabilidade, especificamente aqueles realizados aos 28 dias de cura. Começando com o modelo gerado para o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (Figura 5.22), podemos constatar que este modelo demonstra uma excelente capacidade de previsão. Isso fica evidente, uma vez que os resultados de previsão obtidos para três das quatro misturas de validação estão dentro do intervalo de confiança de 95%.

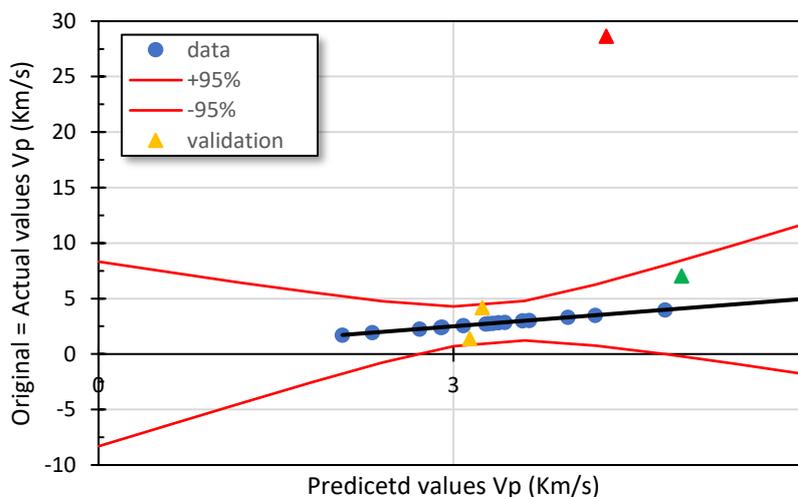


Figura 5.22 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para os 28 dias de cura

Por último, resta analisar os resultados de previsão obtidos pelo modelo para o ensaio de penetração de cloretos aos 28 dias de cura, apresentados na Figura 5.23.

No caso do ensaio de penetração de cloretos, não é possível retirar conclusões sobre a precisão do modelo, uma vez que, como referido no capítulo 4, para este ensaio foram consideradas apenas as misturas com ligante de cimento e ligante de cimento e cal hidráulica simultaneamente, o que por si só limita a qualidade do modelo devido ao número reduzido de misturas avaliadas. O mesmo se aplica às misturas de validação, uma vez que, apenas duas misturas (MV1 e MV4) foram consideradas, pois são as únicas que utilizam os ligantes supramencionados. Portanto, é fácil compreender que o número extremamente limitado de misturas torna difícil obter resultados de previsão precisos para o ensaio de penetração de cloretos.

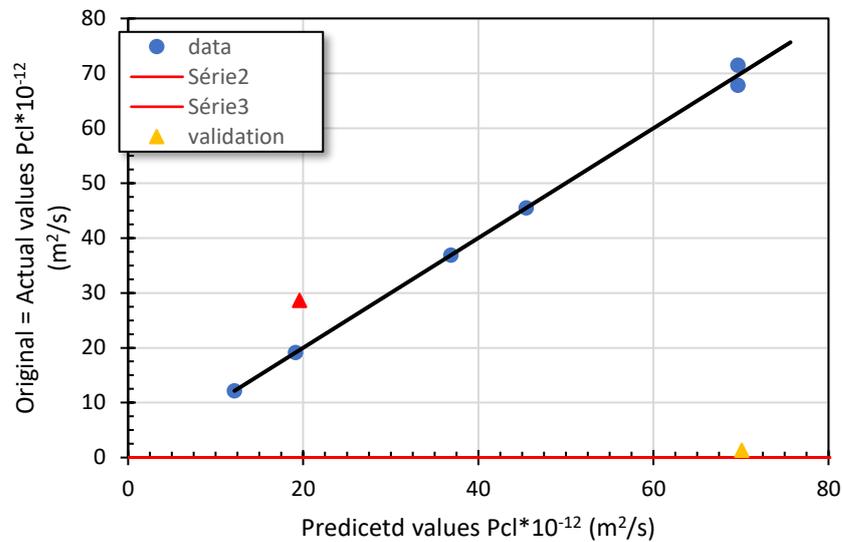


Figura 5.23 - Previsão dos resultados gerados pelo modelo para ensaio de penetração de cloretos para os 28 dias de cura

Após a análise dos resultados provenientes de cada um dos modelos gerados para os respectivos ensaios, é possível inferir que, em termos gerais, esses modelos demonstram uma capacidade de previsão sólida, embora tenham sido submetidos a um conjunto limitado de misturas de validação. Esta conclusão é sustentada pelo facto de que a maioria dos resultados obtidos para estas misturas de validação se situou dentro ou próximo do intervalo de confiança de 95%. No entanto, é importante salientar que uma dessas misturas raramente se aproximou desse intervalo. Tal desvio pode ser atribuído ao facto de que essa mistura foi submetida a um período de cura de 29 dias, ao contrário dos 28 dias padrão, o que possivelmente originou um impacto adverso na consistência dos resultados.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente dissertação teve como objetivo principal estudar as propriedades físicas e mecânicas de vários tipos de argamassas. Argamassas essas constituídas por diferentes tipos de ligante, traços e substituições parciais de ligante por RCP, resíduo proveniente do corte de pedra calcária. O presente capítulo sumariza as principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido, e apresenta sugestões para futuros desenvolvimentos.

6.1. Conclusões

Com base nos resultados dos ensaios realizados e apresentados no capítulo 4, pretende-se retirar uma conclusão geral por forma a perceber se a aplicação de RCP em estudo como substituto parcial do ligante é viável. Paralelamente, serão avaliados os resultados do capítulo 5, relativos aos modelos de previsão gerados pelo software *JMP Pro 2017*, com o objetivo de verificar se esses resultados estão em conformidade com os obtidos no capítulo anterior.

Começando com os resultados obtidos para os ensaios mecânicos discutidos no capítulo 4, retiraram-se as seguintes conclusões:

No ensaio de determinação da resistência à flexão, constatou-se que as resistências obtidas seguiram o padrão esperado. As misturas com ligante de cimento apresentaram o melhor desempenho, de forma geral, comparativamente com as misturas que fizeram uso de outros ligantes. As misturas M2 e MV1 foram as que obtiveram melhores resultados e apresentaram um comportamento muito similar às misturas de referência utilizadas. Salientar que a mistura MV1 aos 7 dias de cura, teve um comportamento superior quando comparada com a mistura de referência REF-1, para a mesma idade de cura, com um acréscimo de resistência em cerca de 3%. Acerca do ganho de resistência entre as respetivas idades de cura, observou-se que as misturas que utilizaram ligante de cal hidráulica, apresentaram os maiores ganhos, embora a resistência máxima tenha sido bastante inferior comparativamente com as restantes misturas.

No que diz respeito ao ensaio de determinação da resistência à compressão, a ordem de classificação foi igual à ocorrida nos ensaios à flexão, relativamente às resistências máximas. As misturas com ligante de cimento foram as que obtiveram melhores resultados, seguidas pelas misturas com ligante de cimento e cal hidráulica aplicados em simultâneo, em terceiro pelas

misturas compostas com escórias e por último as misturas constituídas por cal hidráulica. De todas as misturas analisadas, as misturas M2 e MV1 foram novamente as que obtiveram um melhor comportamento, embora desta vez, tenham alcançado resistências ligeiramente inferiores às misturas de referência. No entanto, salienta-se o facto de que a mistura MV1, aos 7 dias de cura, conseguiu um desempenho superior em cerca de 8% comparativamente com a mistura de referência REF-1. De forma análoga ao ensaio à flexão, as misturas com cimento foram as que apresentaram menores ganhos de resistência no tempo (entre os 7 e 28 dias de cura), devido à sua taxa de cura ser elevada, o que faz com que sejam atingidas resistências altas para os primeiros dias de cura. Em contrapartida, as misturas com ligante de cal hidráulica foram as que obtiveram maiores ganhos de resistência devido à sua cura ser muito lenta.

Em relação ao ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, as conclusões que se podem retirar são semelhantes às dos ensaios mecânicos referidos anteriormente, sendo que as misturas com ligante de cimento garantiram o melhor desempenho, enquanto que as misturas com cal hidráulica tiveram os maiores ganhos de resistência entre os 7 e 28 dias de cura. Quanto às misturas que apresentaram melhor desempenho para este ensaio, foram novamente a mistura M2 e a mistura MV1, sendo que a mistura M2 aos 7 dias de cura apresenta um melhor comportamento que a mistura de referência REF-1, mais concretamente, um desempenho superior em cerca de 18%.

Deste modo, com base em todos os resultados obtidos para os ensaios mecânicos, é possível concluir que, para os ensaios de resistência à flexão e compressão, misturas que apresentem uma substituição de RCP por ligante de cimento entre 5 e 10% e um traço compreendido entre 1:2.5 e 1:3, são capazes de proporcionar resistências semelhantes e até superiores às argamassas de referência. Quanto ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, constata-se que, misturas que apresentem uma substituição em cerca de 5% de RCP por ligante de cimento e possuam um traço compreendido entre 1:2.5 e 1:5, são capazes de fornecer resistências semelhantes às argamassas de referência.

Relativamente aos resultados obtidos para os ensaios de durabilidade abordados no capítulo 4, retiraram-se as seguintes conclusões:

No ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, sabe-se que quanto maior for a velocidade obtida, melhor será a qualidade do material das respetivas argamassas. Como tal, de um modo geral, o desempenho obtido para este ensaio foi semelhante ao obtido para os ensaios mecânicos, onde, as misturas com ligante de cimento obtiveram melhores resultados, seguidas das misturas que combinam ligante de cimento e cal hidráulica em simultâneo. Em terceiro lugar, estão as misturas com ligante de escórias e por último, com o pior desempenho, as

misturas com ligante de cal hidráulica. A mistura M2 foi a que registou maiores velocidades de propagação de ondas ultrassónicas, conseguindo superar a mistura de referência REF-1. Ainda para este ensaio, foi realizado um estudo relativo aos resultados obtidos para misturas com traços iguais, mais concretamente traços 1:2.5, 1:3.75 e 1:5. Observou-se que quanto menor for o traço das argamassas, maior será a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, correspondendo a um melhor desempenho mecânico das argamassas. Também se observou que a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas baixa com o aumento da percentagem de substituição de RCP. Em ambos os casos parece existir uma relação direta entre a homogeneidade da composição da argamassa e a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, aumentando em conjunto.

No que diz respeito ao ensaio de penetração de cloretos, foi avaliado o coeficiente de migração de cloretos e, sabe-se que, quanto menor for esse valor, menor será a facilidade de movimento dos iões de cloreto, e vice-versa. Como foi referido, apenas foram consideradas as misturas com ligante de cimento e misturas com ligante de cimento e cal hidráulica, simultaneamente. Com base nos resultados obtidos, observou-se que, de um modo geral, as misturas constituídas com ligante de cimento foram as que obtiveram melhor desempenho, mais concretamente a mistura M2, que obteve um comportamento muito semelhante ao das misturas de referência. Verificou-se que o traço e o nível de substituição de RCP nas argamassas exercem uma influência significativa na durabilidade dos materiais, sendo que o coeficiente de migração de cloretos tende a aumentar conforme ocorre o aumento dessas duas variáveis. Tal é explicado pelo facto de a um maior traço ou maior substituição de ligante por RCP corresponder uma menor quantidade de ligante face ao agregado, conduzindo a uma estrutura mais porosa, logo, com maior coeficiente de migração de cloretos.

De todas as misturas analisadas, as misturas M2 e MV1 foram as que apresentaram os melhores desempenhos com distinção em todos os ensaios realizados, sendo que é possível concluir que, misturas que apresentem um traço compreendido entre 1:2.5 e 1:3, e um nível de substituição de cimento Portland por resíduos de corte de pedra (RCP) entre 5 e 10%, poderão ser aplicados futuramente em construções, tornando assim o setor da construção mais sustentável.

Agora, relativamente ao que foi abordado no capítulo 5, mais concretamente à utilização da metodologia DOE para previsão de resultados, conclui-se que, com base nos resultados obtidos, foi possível gerar modelos de previsão para cada uma das variáveis de resposta analisadas, com uma elevada eficiência, mostrando-se serem modelos precisos e robustos. Com base neles, é possível estimar as respostas esperadas para qualquer mistura, desde que esteja dentro do espaço de dados de cada modelo.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Por forma a completar a análise realizada sobre a substituição parcial de ligantes por RCP, seguem-se algumas sugestões que poderão trazer um contributo importante para a consolidação deste tema, tais como:

- Realização de mais ensaios de durabilidade, tais como, ensaios de condutividade elétrica e ensaios de absorção de água por capilaridade.
- Realização de um maior número de misturas com ligantes de cimento e cal hidráulica em simultâneo, com o objetivo de as testar no ensaio de penetração de cloretos, garantindo assim, uma maior fiabilidade e precisão de resultados.
- Desenvolvimento de um maior número de misturas de validação, com o objetivo de tornar os modelos DOE ainda mais precisos e robustos.
- Utilização de resíduo de mármore em pó em algumas misturas e não somente resíduo de calcário em pó.
- Desenvolvimento de modelos estatísticos que incorporem como parâmetro de entrada a idade de cura das argamassas.
- Explorar a existência de colinearidades entre as várias respostas, permitindo desta forma simplificar os modelos estatísticos de previsão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGIN, HM, & Turgut, P. (2008). Resíduos de pó de algodão e calcário como material de tijolo. *Construção e Materiais de Construção*, 22(6), 1074–1080.

ALMEIDA, N., Branco, F., de Brito, J., & Santos, J. R. (2007). High-performance concrete with recycled stone slurry. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 210-220.

ALTHEEB, Ali. Quarry dust waste-based cementitious composites–A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 2022, 350: 128817.

ARAÚJO, Emanuel Henrique Adriano. Parametrização e interpretação do comportamento de ondas ultrassônicas em painéis de alvenarias históricas. 2022.

BUILD, NordTest. 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. *Nordtest method*, 1999, 492.10.

CARVALHO, E. A.; CAMPOS, A. R.; PEITER, C. C. Mitigação do Impacto Ambiental provocado por Efluentes de Serrarias de Rochas Ornamentais em Santo Antônio de Pádua. *Relatório Técnico, CETEM, Rio de Janeiro, RJ*, 2003.

CHOUHAN, H. S., Kalla, P., Nagar, R., Gautam, P. K., & Arora, A. N. (2020). Investigating use of dimensional limestone slurry waste as fine aggregate in mortar. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 2223-2245.

CORREIA, António AS; LOPES, Luis; REIS, Marco S. Advanced predictive modelling applied to the chemical stabilisation of soft soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2022, 175.5: 461-471.

DELARAMI, A., Moghaddam, A. M., Yazadani, M. R., & Najjar, S. (2021). Investigation of the main and interactive effects of mix design factors on the properties of cement emulsified

asphalt mortars using Mixture Design of experiment. *Construction and Building Materials*, 266, 120975.

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

EN 1015-2, European Standard, “Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk Número 44, 2012 Engenharia Civil □ UM 29 sampling of mortars and preparation of test mortars”, European Committee for Standardization (CEN), October (1998).

EN 1015 -11. 1999. Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels: European committee for standardization, 1999.

GARCIA, T., NAVES, V., ALVES, J., BARROS, B. D. C., RODRIGUES, C., PEREIRA, E., & ATAÍDES, R. D. A. (2006). Substituição de parte do cimento por finos inertes de pedra em concretos com baixo fator a/c. IV Seminário de Iniciação Científica. Goiânia.

GOMES, Ana Rita Lebreiro. Ativação de escória metalúrgica pela adição de fontes secundárias de alumina. 2018.

GOUVEIA, José Miguel Pereira. Resistência à Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão. 2016. PhD Thesis. Instituto Politécnico do Porto (Portugal).

HOWELL, David C. *Statistical methods for psychology*. Cengage Learning, 2012.

INETI, 2001. Guia Técnico - Sector da Pedra Natural. Lisboa: s.n.

MACHADO, Roberto Gonzaga Fernandes. Incorporação de lamas de pedra em argamassas. MSc Thesis, Universidade do Minho, Portugal, 2012.

MENDES, Cátia Andreia da Costa. Análise comparativa de argamassas de cal. PhD Thesis. Instituto Politécnico de Tomar, Portugal, 2017.

MOURA, Washington A.; GONÇALVES, Jardel P.; LEITE, Rôneison Silva. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. *Sitientibus*, 2002, 26.

NUNES, P. J. d. O. M., 2010. Recursos Geológicos não metálicos: Prospecção, Pesquisa, Exploração ('rochas industriais, argilas, areias, ornamentais'). Lisboa: s.n.

NP-83 (1965), Solos – Determinação da densidade das partículas.

NP EN 933-1. 2014. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica, Método da peneiração. Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2014.

NP EN 1097-3. 2002. Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2002.

NP EN 12504-4. 2007. Ensaio do betão nas estruturas, Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2007.

PONTES, I.F.; VIDAL, F.W.H. Valorização de resíduos de serrarias de mármore e granito e sua aplicação na construção civil. Rio de Janeiro, 2005.

RAMOS, T., Matos, A. M., Schmidt, B., Rio, J., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. *Construction and Building Materials*, 47, 1001-1009.

RANA, A., Kalla, P., & Csetenyi, LJ (2015). Uso sustentável da pasta de mármore no concreto. *Journal of Cleaner Production*, 94, 304–311.

SANTOS, Maria Luíza Lopes de Oliveira. Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil. 2008.

THAPA, Vishojit Bahadur; WALDMANN, Danièle; SIMON, Claude. Gravel wash mud, a quarry waste material as supplementary cementitious material (SCM). *Cement and Concrete Research*, 2019, 124: 105833

WANG, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., & Jia, H. (2018). A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and building materials*, 192, 153-166.

ANEXO A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA

Análise granulométrica - Método de peneiração NP EN 933-1 (2014)			
Identificação da amostra		Areia mais grossa (03)	
Data do Ensaio		03/03/2023	
Procedimento usado		Peneiração a seco	
Registo de resultados			
Massa seca total (g)		207,2	
Abertura dos Peneiros (mm)	Massa do Material retido (g)	Percentagem do material retido (%)	Percentagem cumulativa do material pesado (%)
12,5	0	0,00	100
10	0	0,0	100
8	0	0,00	100
6,3	0	0,00	100
4	0,86	0,42	100
2	31,67	15,28	84
1	51,4	24,81	59
0,5	59,78	28,85	31
0,25	39,61	19,12	12
0,125	14,37	6,94	5
0,063	6,39	3,08	2
Material retido no fundo	1,45		
% de finos que passa no 0.063 mm (%)		3,1	-
Validação de resultados (%)		0,81	<1%

ANEXO B – FICHAS TÉCNICAS DOS LIGANTES

B. 1 Ficha técnica do cimento

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

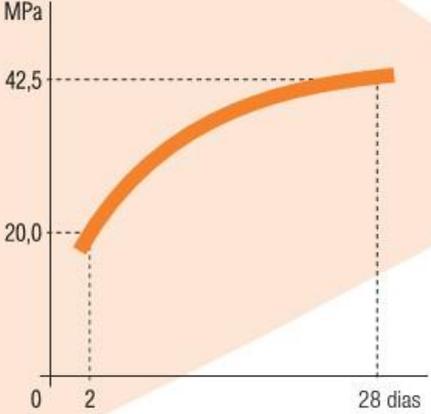
- ▶ Químicas**
Perda ao fogo (P.F) $\leq 5,0\%$;
Resíduo insolúvel (R.I) $\leq 5,0\%$;
Sulfatos (SO_3) $\leq 4,0$;
Cloretos (Cl) $\leq 0,10\%$.
- ▶ Físicas**
Início de presa ≥ 60 min;
Expansibilidade ≤ 10 mm.
- ▶ Mecânicas**
Resistência à compressão
Valores mínimos
2 dias: 20,0 MPa;
28 dias: 42,5 MPa.



Ponte Vasco da Gama

Resistência mecânica à compressão

Curva de crescimento mínimo



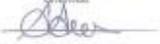
O gráfico mostra a curva de crescimento mínimo da resistência mecânica à compressão em MPa ao longo do tempo em dias. O eixo vertical representa a resistência em MPa, com marcas em 0, 20,0 e 42,5. O eixo horizontal representa o tempo em dias, com marcas em 0, 2 e 28. A curva começa em 20,0 MPa aos 2 dias e atinge 42,5 MPa aos 28 dias.

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

B. 2 Ficha técnica do resíduo de corte de pedra de calcário (RCP)

Composição química obtida por XRF, expressa em % (m/m) e corrigida com o valor da perda por ignição (LOI) a 1050 °C:	
Parâmetro	Amostra A
MgO	0,41
Al ₂ O ₃	0,20
SiO ₂	0,36
P ₂ O ₅	0,04
SO ₃	0,10
Cl	0,01
K ₂ O	0,04
CaO	54,90
Fe ₂ O ₃	0,09
SrO	0,03
LOI	43,80
Perda por ignição	44%
Quantidade de CaO	55%
pH 25°C	7.2
teor de humidade	28.7%

B. 3 Ficha técnica das escórias

ACADORA CIMENTO		ANALİZ RAPORU Analysis Report		
Rapor Tarihi Report Date	7.05.2019			
Rapor No Report No				
NUMUNENİN ADI Sample Type	Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu/Ground Granulated Blast Furnace Slag (TS EN 15167-1:2006)			
ALINDIĞI YER Sample Taken Place	ADANA Çimento Sanayii T.A.Ş. / İskenderun Tesisi			
NUMUNENİN TEMSİL ETTİĞİ DÖNEM Time Period	26/04/2019			
DENEY LABORATUVARI Testing Laboratory	Adana Çimento İskenderun Tesisi Laboratuvarı			
GEMLİ ADI Vessel's Name				
YÜKLENEN MİKTAR Loaded Quantity				
KONŞİMENTO TARİHİ & NO Date & No. Of B/L				
YÜKLEME LİMANI Port Of Loading				
BOŞALTIMA LİMANI Port Of Discharge				
KİMYASAL ÖZELLİKLER CHEMICAL REQUIREMENTS	ELDE EDİLEN DEĞERLER Obtained Results	TS EN 15167-1 SİNER DEĞERLERİ TS EN 15167-1 Standard Limit Values	DENEY METODLARI Test Methods	
Kükürt Trioksit (SO ₃) Sulfur Trioxid	% 0,56	Max. 2,5	TS EN 196-2	
Sülfür (S ²⁻) Sulfide	% -	Max. 2,0	TS EN 196-2	
Klorür (Cl ⁻) Chloride	% 0,0121	Max. 0,1000	TS EN 196-2	
Kudirma Kaybı Loss on Ignition	% 1,77	Max. 3,0	TS EN 196-2	
MgO Magnesium oxide	% 8,41	Max. 18,0	TS EN 196-2	
Sodyum Oksit (Na ₂ O)* Sodium Oxide	% -	-	TS EN 196-2	
Potasyum Oksit (K ₂ O)* Potassium Oxide	% -	-	TS EN 196-2	
Toplam Alkali (Na ₂ O Eşdeğeri) Total Alkali (Na ₂ O Equivalent)	% -	-	TS EN 196-2	
Rutubet Moisture Content	% 0,10	Max. 1,0	-	
CaO+MgO/SiO ₂	1,12	Min. 1,0	TS EN 196-2	
FİZİKSEL ÖZELLİKLER PHYSICAL REQUIREMENTS				
Özgül Ağırlık Specific Gravity	g/cm ³ 2,90	-	TS EN 196-6	
Özgül Yüzey Specific Surface	m ² /kg 5640	≥ 2750	TS EN 196-6	
Priz Başlangıcı Initial Setting Time	dakika minutes	5 Test Çim. P.Baş. Sür. 2 Karb.	TS EN 196-3	
7 Günlük Aktivite İndeksi 7 Days Activity Index	%	≥ 45	TS EN 196-1	
28 Günlük Aktivite İndeksi 28 Days Activity Index	%	≥ 70	TS EN 196-1	
Arif ACER Kimyager Chemist 				
Bu rapor deney laboratuvarının izni olmadan çoğaltılamaz. Deneysel sonuçların yitirilmesi sorumluluğu aittir. *Harcama için standartlarda belirtilen bir gereklilik bulunmamaktadır.				
This report cannot be copied without permission of the test laboratory. Test results belong to the sample defined client. There is no defined requirement in the harmonized standard.				

B. 4 Ficha técnica da cal hidráulica

CAL HIDRÁULICA

HL 5



EN 459-1 1328

▶ Constituintes

Calcário margoso cozido com extinção e moagem

▶ Características

▶ Químicas

Cal disponível (Ca(OH)_2) $\geq 4,0\%$;
Sulfatos (SO_3) $\leq 3,0\%$.

▶ Físicas

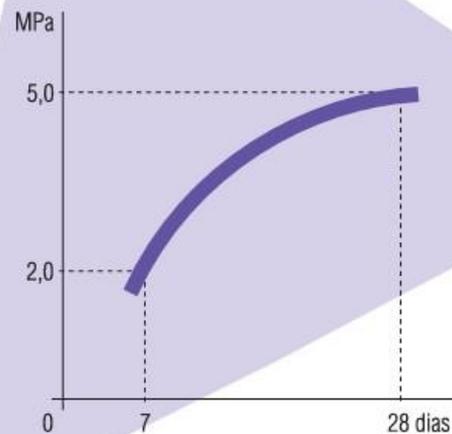
Água livre $\leq 2,0\%$;
Resíduo a 0,090 mm $\leq 15,0\%$;
Resíduo a 0,200 mm $\leq 5,0\%$;
Expansibilidade $\leq 2,0$ mm;
Penetração > 10 mm e < 50 mm;
Teor de ar $\leq 25,0\%$;
Tempo de início de presa > 1 h;
Tempo de fim de presa ≤ 15 h.

▶ Mecânicas

Resistência à compressão
Valores mínimos
7 dias: $\geq 2,0$ MPa;
28 dias: $\geq 5,0$ MPa.

Resistência mecânica à compressão

Curva de crescimento mínimo



B. 5 Ficha técnica da cal hidratada



Descrição do produto:
Cal hidratada superventilada, resulta da hidratação da cal viva obtida de um calcário de elevada pureza (CaCO₃).

Campo de utilização na construção civil e obras públicas:
-Argamassas de reboco e assentamento;
-Pinturas;
-Estabilização de solos de estradas, aeroportos, caminhos de ferro, parques de estacionamento;
-Enriquecimento de misturas asfálticas.

Fornecimento e estocagem:
A cal hidratada é fornecida em sacos de 22 kg, sobre paletes ou a granel em camião-cisterna.
Armazenar em lugar fresco, seco e não ventilado. Manter as embalagens invioladas.

Qualidade e assistência:
Uma unidade produtiva dotada das melhores tecnologias disponíveis no sector, garante uma elevada produtividade e um constante controlo sobre o processo produtivo.
A qualidade é garantida por controlos diários em laboratório interno.
O nosso pessoal técnico está qualificado e disponível para prestar assistência e aconselhamento técnico.

Higiene e segurança:
Durante o manuseamento do produto, recomenda-se o uso de máscara anti-poeiras e de luvas. Caso ocorra contacto com a vista, lavar abundantemente em água corrente. Consultar a ficha de segurança.

Dados técnicos (NPEN 459):
Classificação: CL 80 S
Pureza média: 90% Ca(OH)₂
Peso específico: 1100 kg/ m³
pH: 12
Humidade: < 0,1%

Advertências:
Os dados aqui publicados, são fruto de experiências em obra e em laboratório. As notas técnicas e todas as outras indicações devem considerar-se apenas como puramente indicativas e são fornecidas de modo a contribuir para um correcto e mais apropriado emprego do produto; o utilizador é totalmente responsável em relação à utilização que faça do produto.



Apresentação:
Saco de 22 kg



Calcidrata
DESENVOLVIMENTOS, S.A.

Endereço: Av. Cláudio
N.º 26, Póvoa
2025-122 Alcanide
Santarem Portugal

Telefone:
(+351) 213 439 030
Domicílio:
(+351) 218 493 938
Fax:
(+351) 213 439 030

E-mail:
calhidrat@calcidrata.pt
www.calcidrata.pt

B. 6 Ficha técnica do superplastificante



FICHA DE DADOS DO PRODUTO

Sika® ViscoCrete®-3009

SUPERPLASTIFICANTE PARA BETÃO

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Sika® ViscoCrete®-3009 é um superplastificante forte redutor de água para betão

UTILIZAÇÕES

Sika® ViscoCrete®-3009 permite obter uma plastificação muito forte e uma boa manutenção de consistência.

Sika® ViscoCrete®-3009 é especialmente adequado para os seguintes casos:

- Betão com 20% ou mais de redução de água de amassadura
- Betão muito plástico ou fluido com resistências finais melhoradas e com menor custo
- Caldas de cimento, permitindo reduzir fortemente a água de amassadura e aumentar a fluidez, diminuindo as tendências para exsudação e retracção e aumentando as resistências mecânicas
- Betão de classe de resistência média a alta, com qualquer consistência, nos quais se pretenda obter uma economia grande de cimento

CARACTERÍSTICAS / VANTAGENS

Sika® ViscoCrete®-3009 actua sobre as partículas do cimento por dois mecanismos principais: adsorção superficial e efeito espacial. Ambos concorrem para um efeito dispersante muito intenso, permitindo grande redução de água de amassadura e acelerando as reações químicas de hidratação do cimento.

Obtêm-se as seguintes vantagens:

- Elevada redução de água, podendo atingir 20% a 30% daqui resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas e de permeabilidade muito baixa
- Efeito plastificante intenso, permitindo obter, mesmo com forte redução de água, consistências favoráveis para uma colocação e autocompactação fáceis
- Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em pré-fabricação ou betão pronto, com bom desenvolvimento de resistências à compressão
- Um comportamento mais favorável quanto à retracção e quanto à fluidez

CERTIFICADOS / NORMAS

Adjuvante para betão de acordo com EN 934-2, Tabela 3.1 e 3.2, e fornecido com marcação CE

DADOS DO PRODUTO

Base química	Solução aquosa de policarboxilatos modificados
Fornecimento	210 kg (bidão), 1050 kg (IBC), granel
Aspecto / Cor	Líquido castanho claro, levemente turvo
Tempo de armazenamento	12 meses após a data de fabrico
Armazenagem e conservação	Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa, a temperaturas entre +5 °C e +35 °C.
Massa volúmica	1,05 ± 0,02 kg/l (a +20 °C)
Valor do pH	4,0 ± 1,0
Teor de iões cloreto	≤ 0,1 %