



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Civil

ISEL

Optimização de caldas de cimento para trabalhos de injecção em Geotecnia

DIOGO MANUEL MARQUES SILVA

(Licenciado em Engenharia Civil)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Área de Especialização em Edificações

(Documento Definitivo)

Orientador (es):

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

Licenciado, André Duarte Reis Ferreira Martins, Director do Departamento Gestão Integrada (Rodio Portugal, S.A)

Júri:

Doutor, João Alfredo Santos, Prof. Coordenador (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa)

Doutor, João Filipe Meneses Espinheira Rio e Investigador Auxiliar (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

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

Licenciado, André Duarte Reis Ferreira Martins, Director do Departamento Gestão Integrada (Rodio Portugal, S.A)

Dezembro 2010

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho que considero uma importante etapa no meu percurso académico e uma importante mais-valia na minha futura carreira enquanto engenheiro civil, não seria possível sem o apoio e a presença de muitas pessoas e entidades a quem desejo expressar o meu agradecimento:

À Professora Doutora Carla Costa (orientador), pela presença e partilha de conhecimento em todas as fases do trabalho, e pela forma atenciosa e a disponibilidade com que se prontificou a esclarecer dúvidas e pelo espírito crítico ao trabalho, que fundamentaram o enriquecimento científico e literário deste estudo. Acrescento ainda o meu especial agradecimento à forma como se disponibilizou e prontificou a resolver problemas logísticos que surgiram durante o desenvolvimento da campanha experimental, e pela sua colaboração preciosa na indicação de bibliografia pertinente para o tema em estudo.

Ao Eng^o André Martins (co-orientador), manifesto a minha gratidão pela disponibilidade na orientação na fase da campanha experimental desenvolvida *in situ*, pela partilha de conhecimentos fundamentais não só para este trabalho como para a minha futura carreira profissional. Agradeço ainda toda a sua disponibilidade, paciência, interesse e prontidão em me ajudar a ultrapassar e a esclarecer dúvidas que surgiram ao longo de todo o trabalho.

À RODIO, pela oportunidade que me concedeu em desenvolver este estágio. Aproveito também para agradecer o cimento que disponibilizaram para a realização da campanha experimental no Laboratório de Materiais de Construção do ISEL, bem como todo o material e equipamentos que gentilmente cederam para o desenvolvimento deste estudo. Expresso ainda o meu especial agradecimento pelo artigo científico que adquiriram para que a fundamentação dos resultados experimentais fosse melhor sustentada.

À Raquel e ao António (técnicos do Laboratório de Materiais de Construção do ISEL), pelo incansável apoio, presença, disponibilidade e forma atenciosa com que me ajudaram durante toda a campanha experimental desenvolvida no laboratório, e pelo ensinamento das técnicas laboratoriais e métodos de ensaios realizados. Gostaria ainda de expressar o meu agradecimento pela forma com que se prontificaram em resolver problemas de logística que surgiram.

Ao Sr. Hélder, técnico do LNEC, pela sua atenção e cooperação em me receber no LNEC para efectuar os ensaios de resistência mecânica de provetes cúbicos.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção do IST, pelo total apoio que demonstraram para a realização de ensaios de resistência mecânica de provetes cúbicos, no dia em que a prensa do laboratório do ISEL avariou.

Aos meus amigos, por acreditarem sempre nas minhas capacidades e pela força que me dão em todos os momentos.

À Ana, a minha namorada, pela constante demonstração de força, apoio e motivação que me incutiu para que a conclusão deste trabalho fosse um sucesso e, especialmente, a sua compreensão pelo tempo que tive que abdicar para me dedicar ao desenvolvimento deste estudo.

A toda a minha família, pelos exemplos de sucesso que ao longo da minha vida me demonstraram e que certamente foram uma mais valia para que este trabalho nunca fosse uma dúvida mas sim uma certeza.

Ao meu irmão, pela constante preocupação, todos os fins-de-semana, quando regressava às Caldas da Rainha, mostrou em saber “Como está a correr a tese, meu?!”. Espero que este trabalho seja uma motivação extra para o seu ainda curto, mas já brilhante percurso escolar, e que seja apenas um simples exemplo do que ele poderá atingir.

Por fim, quero agradecer aos meus pais pelos valores e princípios que sempre me transmitiram até hoje, e que são a base do sucesso de todas as etapas da minha vida. A eles dedico este trabalho, cujo orgulho que tenho na sua conclusão é o mesmo orgulho que tenho em ser seu filho.

RESUMO

O presente estudo foi enquadrado por um estágio na empresa RODIO S.A. com o objectivo de contribuir para a compreensão da influência de variações na preparação experimental de caldas de cimento na dispersão dos resultados dos ensaios de resistência à compressão e para avaliar a reprodutibilidade dos resultados obtidos na realização dos ensaios às caldas de cimento de acordo com as normas NP EN 445:2008 [1] e REBAP, em vigor [2].

A campanha experimental foi desenvolvida, numa primeira fase, em laboratório e posteriormente *in situ*. No laboratório, o plano de ensaios foi concebido para, primeiro, se efectuar o estudo de caldas preparadas com a mesma composição em que se variou sistematicamente o equipamento de mistura e a sequência de introdução dos constituintes no misturador, permitindo a avaliação da influência da variação do procedimento de mistura nas propriedades das caldas. Posteriormente, estudaram-se sete formulações de caldas de cimento, constituídas pelo mesmo tipo de cimento e variando apenas a razão A/C. No estado fresco destas caldas, foi avaliada a massa volúmica, o teor de ar e o tempo de presa e, no estado endurecido, foram determinadas as resistências mecânicas e a velocidade de propagação de ondas ultrasónicas das mesmas caldas, em provetes paralelepípedicos e cúbicos.

Na fase da campanha experimental desenvolvida *in situ* foram preparadas caldas constituídas pelo mesmo tipo de cimento das estudadas no laboratório e determinadas as suas resistências, também em provetes paralelepípedicos e cúbicos, com o intuito de correlacionar os valores obtidos *in situ* e no laboratório. Posteriormente, foi desenvolvido um estudo de caldas preparadas *in situ*, com o objectivo de correlacionar os valores das suas resistências mecânicas em provetes paralelepípedicos e cúbicos com os valores da tensão de rotura das mesmas caldas ao nível do bolbo de selagem das microestacas.

Analisando os resultados experimentais obtidos concluiu-se que o valor da resistência mecânica das caldas diminui com o aumento da razão água/cimento utilizada na sua preparação e que a resistência à compressão das caldas curadas em provetes paralelepípedicos (de acordo com a norma NP EN 445:2008 [1]) é sistematicamente superior à resistência das mesmas caldas curadas em provetes cúbicos (de acordo com o REBAP [2]).

Palavras-chave:

Calda de cimento; Razão A/C; Reprodutibilidade; Dispersão; Provetes paralelepípedicos; Provetes cúbicos; Resistência mecânica; lei de Abrams.

ABSTRACT

This research was conducted in academic and industrial environment in collaboration with RODIO S.A. Company. The main goals of the study were: (i) to contribute to understand the influence of variations of experimental cement grout preparation protocol on their properties and (ii) to compare results of mechanical properties obtained for the same cement grout tested following both NP EN 445 : 2008 [1] and REBAP [2] standards.

The experimental campaign was initially carried out in the laboratory and subsequently *in situ*. In the laboratory, cement grouts with the same composition were prepared changing systematically the mixing equipment and the introduction sequence of the materials into the mixer, in order to study the sensitivity of grouts properties against variation of mixing procedure. Subsequently, properties of fresh and hardened cement grouts prepared with seven different water / cement ratio cement grouts were evaluated. Tests of density, air content and the initial and final set times, were carried out on fresh cement pastes. In the hardened conditions of these cement grouts, the mechanical strength and the ultrasonic pulse velocity were evaluated in parallelepiped and cubic specimens.

In the experimental phase carried out *in situ*, cement grouts were prepared with the same type of cement used on cement grouts prepared in laboratory. The mechanical strength of these cement grouts were evaluated, in parallelepiped and cubic specimens, in order to correlate the values of mechanical strength obtained *in situ* and in the laboratory. Subsequently, a study was carried out with cement grouts prepared *in situ*, in order to correlate their mechanical strength on parallelepiped and cubic specimens with rupture tension values of the cement grouts on micropiles.

Analyzing the results obtained it was concluded that the evolution of values obtained in the mechanical strength of the cement grouts studied showed the same trend referred by Abrams. It was also concluded that the compressive strength value of the cement grouts is always higher in parallelepiped specimens than the value determined in cubic specimens.

Key-words:

Cement grout; water/cement ratio; Reproducibility; Dispersion; Parallelepiped specimens; Cubic specimens; Mechanical strength; Abrams's law.

LISTA ABREVIATURAS

ΔV – variação de volume

A/C – água/cimento

DP – desvio padrão

Seq. Ent. Consti. – sequência de entrada dos constituintes

IST – Instituto Superior Técnico

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

V_{aparente} – velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas (km/s)

d – distância percorrida pela onda (entre os transdutores) (mm)

t – tempo gasto pela onda a percorrer a distância entre os transdutores (μs)

F_f – resistência de rotura à flexão [MPa]

F – força de rotura à flexão (valor de pico registado pela prensa) [N]

l – distância entre os apoios cilíndricos de apoio do provete [mm]

b – largura do paralelepípedo [mm]

d – espessura do paralelepípedo [mm]

F_c – resistência de rotura à compressão [MPa]

F – força de rotura à compressão (valor de pico registado pela prensa) [N]

A – área de aplicação da carga [mm²]

Tx – transdutor emissor

Rx – transdutor receptor

ÍNDICE

Agradecimentos.....	I
Resumo	III
Abstract	V
Lista abreviaturas	VI
Índice	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tabelas	XV
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Objectivos do trabalho.....	1
1.3 Metodologia.....	2
1.4 Estrutura da dissertação	3
2. Estado da arte	4
2.1 Aplicação e função de caldas de cimento em obras de geotecnia.....	4
2.1.1 Microestacas	5
2.1.2 Ancoragens	7
2.1.3 <i>Jet Grouting</i>	9
2.2 Características das caldas de cimento.....	10
2.2.1 Fluidez / trabalhabilidade	10
2.2.2 Exsudação.....	11
2.2.3 Teor em ar	11
2.2.4 Durabilidade	12
2.2.5 Resistência mecânica.....	12
2.3 Composição das caldas de cimento em geotecnia.....	14
2.3.1 Razão A/C	14
2.3.2 Cimento	14
2.3.3 Água	15
2.3.4 Aditivos	15
2.4 Preparação de caldas	16
2.5 Normalização.....	17

2.6	Obra da RODIO acompanhada no desenvolvimento da campanha experimental.....	20
3.	Campanha experimental	21
3.1	Introdução.....	21
3.2	Constituintes das caldas de cimento.....	22
3.3	Preparação das caldas no laboratório.....	25
3.3.1	Equipamento	25
3.3.2	Protocolo de amassadura com o misturador de pá	26
3.3.3	Protocolo de amassadura com o misturador de hélice	27
3.4	Preparação das caldas de cimento <i>in situ</i> (obra).....	29
3.5	Preparação das caldas de cimento <i>in situ</i> para a execução de microestacas (instalações da RODIO)	30
3.6	Ensaio de caldas no estado fresco.....	31
3.6.1	Massa Volúmica	32
3.6.2	Teor em Ar.....	33
3.6.3	Determinação do início e fim de presa.....	35
3.6.4	Moldagem, Desmoldagem e Cura de Provetes Paralelepípedicos.....	37
3.6.5	Moldagem, Desmoldagem e Cura de Provetes Cúbicos	39
3.6.6	Execução e Cura de Microestacas em meio não confinado	40
3.7	Condições ambientais de cura	41
3.7.1	Provetes paralelepípedicos e cúbicos	41
3.8	Ensaio de caldas no estado endurecido	43
3.8.1	Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-sónicas	43
3.8.2	Avaliação da Resistência mecânica.....	45
3.8.2.1	Provetes Paralelepípedicos.....	45
3.8.2.2	Provetes Cúbicos	48
3.8.3	Pressão de rotura das microestacas em meio não confinado	49
4.	Apresentação, análise e discussão de resultados experimentais	52
4.1	Caldas de cimento preparadas no laboratório	52
4.1.1	Sensibilidade das propriedades das caldas em relação a variações do protocolo de amassadura.....	53
4.1.2	Massa volúmica.....	54
4.1.3	Teor em ar	57

4.1.3.1	Correlação entre teor em ar e massa volúmica	58
4.1.4	Tempo de presa	59
4.1.5	Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas	60
4.1.6	Resistência mecânica.....	63
4.1.6.1	Resistência à flexão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos.....	64
4.1.6.2	Resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos	66
4.1.6.2.1	Reprodutibilidade dos resultados de resistência à compressão de caldas em provetes cúbicos, em relação à variação do equipamento de ensaio	69
4.1.7	Relação entre a resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos	70
4.1.8	Relação da resistência à compressão e velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos	75
4.1.9	Relação entre a massa volúmica e resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos	76
4.2	Caldas de cimento preparadas <i>in situ</i> (Obra)	77
4.3	Caldas de cimento preparadas <i>in situ</i> (nas instalações da RODIO).....	79
5.	Conclusões	83
5.1	Conclusões gerais	83
5.2	Perspectivas de desenvolvimento futuro	86
6.	Referências bibliográficas	88
7.	Anexos	i
	Anexo I – Ficha técnica com os valores médios dos resultados do autocontrolo periódico das características do cimento utilizado neste trabalho, efectuado pela Secil.....	i
	Anexo II – Determinação da humidade relativa da sala condicionada utilizada para a cura dos provetes.....	ii
	Anexo III – Quantidades de material utilizados nas caldas de cimento preparadas em laboratório.....	iii
	Anexo IV – Resultados obtidos nos ensaios efectuados nas caldas de cimento preparadas no Laboratório.	iv
	Anexo V – Resultados da resistência à compressão de caldas de cimento de razão A/C de 0,7 com 2 dias de idade, curadas em provetes cúbicos e determinados em equipamentos de ensaio diferentes.	vi

Anexo VI – Resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão das caldas preparadas *in situ*, na obra.....vii

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tubos de aço que constituem a armadura das microestacas [adaptado de 8].	5
Figura 2.2 – Esquema em perfil de injeção selagem de uma microestaca através da tecnologia de Injeção Repetitiva Selectiva (IRS).	7
Figura 2.3 – a) Pormenor de um cabo de ancoragem; b) Cabos de ancoragem [arquivo RODIO Portugal SA.]	8
Figura 2.4 – Fases de execução do Jet Grouting: a) perfuração; b) injeção de calda; c) subida da sonda e formação da coluna; d) selagem e repetição do processo [adaptado 7].	10
Figura 3.1 – Bidões metálicos de fecho estanque onde foi armazenado o cimento usado nas caldas preparadas no laboratório.	23
Figura 3.2 – a) Misturador de pá; b) Misturador de hélice.	25
Figura 3.3 – Disposição, forma e dimensões do recipiente e pá misturadora constituintes do equipamento misturador de pá. [adaptado de [23]].	26
Figura 3.4 – Esquema de montagem do equipamento utilizado para a produção de caldas com misturador de hélice.	28
Figura 3.5 – Equipamento UNIGROUT utilizado para a produção de caldas de cimento para trabalhos de injeção em obras de geotecnia (adaptado de [30]).	29
Figura 3.6 – Aparelho contador de litros.	30
Figura 3.7 – Introdução do cimento na cuba.	30
Figura 3.8 – Exemplo de uma betoneira tradicional.	31
Figura 3.9 – a) Equipamento utilizado para a avaliação da massa volúmica das caldas; b) Esquema do aparelho utilizado [adaptado 31].	32
Figura 3.10 – a) Conjunto aerómetro–base; b) Esquema exemplificativo do aerómetro.	34
Figura 3.11 – a) Agulhas para determinação do início e fim de presa; b) Aparelho de Vicat.	36
Figura 3.12 – Moldes de aço para moldagem de provetes paralelepípedicos.	38
Figura 3.13 – Moldes para preparação de provetes cúbicos.	39
Figura 3.14 – Elementos utilizados na execução das microestacas concebidas neste trabalho.	40
Figura 3.15 – Introdução de calda de cimento nos moldes.	41
Figura 3.16 – Micro-estaca desmoldada e outra em fase de desmoldagem.	41
Figura 3.17 – Tanque com água na sala condicionada, onde os provetes foram colocados depois de desmoldados.	42

Figura 3.18 – Higrómetro para controlo da temperatura e humidade relativa.....	42
Figura 3.19 – Equipamento para avaliação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.....	44
Figura 3.20 – Equipamento para ensaio de flexão e compressão de provetes paralelepípedos.....	46
Figura 3.21 – a) Obturador fechado [8]; b) Obturador aberto [8].....	49
Figura 3.22 – Esquema de introdução do obturador no interior do tubo de aço da micro-estaca.....	50
Figura 3.23 – Equipamento de monitorização e registo da pressão injectada na micro-estaca.....	50
Figura 4.1 – Valores médios da massa volúmica por razão A/C estudada.....	55
Figura 4.2 – Representação dos valores da massa volúmica em função da razão A/C obtidos nas caldas estudadas no presente trabalho e por Rosquiel [3].....	56
Figura 4.3 – Valores médios do teor em ar por razão A/C estudada.....	57
Figura 4.4 – Relação entre os valores do teor em ar e da massa volúmica das caldas estudadas.....	59
Figura 4.5 – Evolução dos valores do início e fim de presa obtidos por razão A/C estudada.....	60
Figura 4.6 – Evolução dos valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos por razão A/C estudada.....	62
Figura 4.7 – Evolução dos valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos nas caldas com razão A/C de 0,5 ao longo do período de cura.....	63
Figura 4.8 – Evolução dos valores da resistência à flexão obtida nas caldas com 2, 7 e 28 dias de idade e curadas em provetes paralelepípedos.....	65
Figura 4.9 – Evolução dos valores da resistência à flexão ao longo do tempo das caldas para as diferentes razões A/C estudadas e curadas em provetes paralelepípedos.....	66
Figura 4.10 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 2, 7 e 28 dias de idade e curadas em provetes paralelepípedos, por razão A/C estudada.....	66
Figura 4.11 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 2, 7 e 28 dias de idade e curadas em provetes cúbicos, por razão A/C estudada.....	67
Figura 4.12 – Evolução dos valores da resistência à compressão ao longo do tempo das caldas para as diferentes razões A/C estudadas e curadas em provetes paralelepípedos.....	68

Figura 4.13 – Evolução dos valores da resistência à compressão ao longo do tempo das caldas para as diferentes razões A/C estudadas e curadas em provetes cúbicos.	69
Figura 4.14 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 2 dias de idade curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, em função da razão A/C usada na preparação da calda.	70
Figura 4.15 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 7 dias de idade curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, em função da razão A/C usada na preparação da calda.	70
Figura 4.16 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 28 dias de idade curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, em função da razão A/C usada na preparação da calda.	71
Figura 4.17 – Evolução dos valores da resistência à compressão ao longo do tempo das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, para cada razão A/C estudada: a) A/C = 0,4; b) A/C = 0,5; c) A/C = 0,6; d) A/C = 0,7; e) A/C = 0,8; f) A/C = 0,9; g) A/C = 1,0.	72
Figura 4.18 – Evolução dos valores da resistência à compressão ao longo do tempo de uma argamassa de cimento produzida de acordo com o disposto na norma NP EN 196-1:2006 [23], usando o mesmo cimento caldas e com uma razão A/C de 0,5.	73
Figura 4.19 – Relação entre os valores da resistência à compressão das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e em provetes cúbicos.	74
Figura 4.20 – Relação entre os valores da resistência à compressão e da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos em caldas de cimento com razão A/C = 0,5, curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, ao longo do período de cura (2, 7 e 28 dias).	75
Figura 4.21 – Relação entre os valores da resistência à compressão e da massa volúmica obtidos em caldas com 2, 7 e 28 dias de idade, curadas em provetes paralelepípedicos.	76
Figura 4.22 – Relação entre os valores da resistência à compressão e a massa volúmica obtidos em caldas com 2, 7 e 28 dias de idade, curadas em provetes cúbicos.	76
Figura 4.23 – Evolução dos valores da resistência à compressão de caldas preparadas <i>in situ</i> e das caldas com razões A/C de 0,5 e 0,6 preparadas em laboratório.	78
Figura 4.24 – Evolução da relação entre a resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e os valores da tensão de rotura das mesmas caldas em microestacas, preparadas com betoneira tradicional e misturador mecânico UNIGROUT.	81

Figura II.1 – Tabela para determinação da humidade relativa da sala de cura
[adaptado 31]..... ii

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estudo comparativo entre as normas NP EN 447:2008 [4] e REBAP [2] (para caldas de injeção de bainhas para armaduras de pré-esforço) no que respeita ao modo de preparação e requisitos que as suas propriedades devem satisfazer.	18
Tabela 3.1 – Resumo das caldas usadas neste trabalho.	24
Tabela 3.2 – Protocolos utilizados nas amassaduras das caldas com o misturador de pá.	27
Tabela 3.3 – Protocolo utilizado nas amassaduras das caldas com o misturador de hélice.	28
Tabela 3.4 – Protocolo utilizado na produção de caldas de cimento <i>in situ</i>	30
Tabela 3.5 – Protocolo utilizado na produção de caldas <i>in situ</i> com betoneira tradicional.	31
Tabela 3.6 – Protocolo de ensaio para determinação da massa volúmica das caldas.	33
Tabela 3.7 – Protocolo de ensaio para determinação do teor em ar das caldas de cimento.	35
Tabela 3.8 – Protocolo de ensaio para determinação do início e fim de presa das caldas de cimento.	37
Tabela 3.9 – Protocolo de moldagem, desmoldagem e cura de provetes com caldas preparadas no laboratório e <i>in situ</i>	39
Tabela 3.10 – Protocolo utilizado para a preparação das microestacas.	41
Tabela 3.11 – Protocolo de ensaio para determinação da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas em provetes paralelepípedicos e cúbicos.	45
Tabela 3.12 – Protocolo de ensaio de determinação da resistência à flexão de caldas em provetes paralelepípedicos.	46
Tabela 3.13 – Protocolo de ensaio de determinação da resistência à compressão de caldas em provetes paralelepípedicos.	47
Tabela 3.14 – Protocolo de ensaio de determinação da resistência à compressão de caldas em provetes cúbicos.	49
Tabela 3.15 – Protocolo de ensaio para a determinação da pressão de rotura das microestacas em meio não confinado.	51
Tabela 4.1 – Valor médio dos resultados obtidos nos ensaios das caldas com razão A/C de 0,5, independentemente do protocolo utilizado na sua preparação.	53
Tabela 4.2 – Comparação dos valores da massa volúmica por razão A/C obtidos nas caldas estudadas no presente trabalho e por Rosquiel [3].	56
Tabela 4.3 – Valores médios do tempo de presa obtidos para cada formulação estudada.	59

Tabela 4.4 – Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos por razão A/C estudada.....	61
Tabela 4.5 – Valores médios da resistência mecânica obtidos por razão A/C estudada.	64
Tabela 4.6 - – Valores das resistências à compressão e tensão de rotura das caldas de cimento preparadas <i>in situ</i> com a betoneira tradicional e com o misturador mecânico UNIGROUT.	80

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA

As caldas de cimento têm um grande domínio de aplicação em obras de geotecnia, podendo ser utilizadas em trabalhos como: ancoragens, microestacas e, ainda, na consolidação ou impermeabilização de terrenos utilizando técnicas de injeção a alta pressão como o *Jet Grouting*.

O constante desenvolvimento destas tecnologias, bem como o crescimento da complexidade das obras de engenharia e a preocupação cada vez maior com a gestão e sustentabilidade dos recursos materiais e financeiros, estão a contribuir para a procura, cada vez mais acentuada, da utilização de procedimentos de construção baseados em critérios científicos, e portanto mais rigorosos.

Neste sentido, as actividades desenvolvidas neste Trabalho Final de Mestrado foram definidas para corresponderem às necessidades da empresa RODIO Portugal SA, no âmbito de Estágio Curricular, para:

- por um lado, corresponderem às necessidades de aumento de conhecimento no domínio da composição das caldas de cimento, da sua relação com as propriedades que apresentam no estado fresco e endurecido, e na consolidação de métodos de avaliação da qualidade *in situ* que conduzam a resultados reprodutíveis com os obtidos no laboratório e,
- por outro lado, encerrarem a abordagem e a profundidade científica necessária a trabalhos conducentes à obtenção do grau de Mestre.

O contributo para o aumento do conhecimento fundamental concorrerá para a realização de obras de engenharia com qualidade e economia.

1.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO

Com o desenvolvimento deste trabalho pretende-se atingir e cumprir os seguintes objectivos:

- Contribuir para o aumento da sensibilidade em relação ao efeito de variações na realização experimental na dispersão dos resultados dos ensaios das caldas de cimento;

- Avaliação da reprodutibilidade dos resultados obtidos em função da realização dos ensaios de acordo com duas normas diferentes (NP EN 445:2008 [1] e REBAP [2]), em vigor;
- Obtenção da correlação da composição das caldas com as propriedades reológicas e resistência mecânica.

1.3 METODOLOGIA

A abordagem metodológica seguida neste trabalho foi a seguinte:

1. Acompanhamento da execução, de casos práticos em obras de engenharia, de processos construtivos de injeção de caldas e selagem de ancoragens e microestacas;
2. Campanha experimental no laboratório e *in situ*:

Laboratório do ISEL:

- Preparação de caldas de cimento que reproduzam a composição das utilizadas nas obras e com variações sistemáticas da razão A/C.
- Avaliação das seguintes propriedades das caldas preparadas: resistência mecânica (aos 2, 7 e 28 dias), massa volúmica, tempo de presa e teor em ar.

In situ:

Preparação de caldas e moldagem de provetes paralelepípedicos e cúbicos *in situ* para avaliação da resistência mecânica.

3. Simulação de execução de microestacas em meio não confinado para a determinação da tensão de rotura das caldas de recobrimento das microestacas através da injeção das manchetes. Obtenção da correlação da tensão de rotura das microestacas com a resistência mecânica das caldas em provetes paralelepípedicos e cúbicos.
4. Redacção do relatório de estágio.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é constituída pelas 7 Secções que se descrevem de forma sucinta abaixo.

A Secção 1 engloba a introdução, onde se faz a referência ao enquadramento do tema estudado, apresentam-se os objectivos, a metodologia adoptada para o desenvolvimento do trabalho e expõe-se a estrutura do texto da dissertação.

A abordagem ao estado da arte constitui a Secção 2, baseada em referências bibliográficas, onde se pretende referir os aspectos relacionados com as caldas de cimento utilizadas em geotecnia que são fundamentais para a compreensão do tema em estudo.

Na Secção 3 apresenta-se a campanha experimental desenvolvida. Referem-se os equipamentos e constituintes das caldas utilizados na sua preparação, bem como os protocolos de amassadura usados para a preparação das caldas nas diferentes fases da campanha experimental. São ainda descritos os ensaios efectuados, e sistematizados os protocolos adoptados para a execução dos ensaios de avaliação das propriedades das caldas, e de moldagem, desmoldagem e cura dos provetes preparados.

A Secção 4 destina-se à apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios às caldas estudadas, nos estados fresco e endurecido. A análise dos resultados é sustentada em gráficos, tabelas e, sempre que possível, em referências de estudos realizados por outros autores. São estabelecidas correlações entre os resultados das diversas propriedades obtidas em fases distintas da campanha experimental, de forma a melhor compreender e caracterizar o comportamento das caldas testadas.

Na Secção 5 apresentam-se as conclusões e apresentam-se perspectivas de desenvolvimento futuro neste domínio.

Na Secção 6 constam as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

Por fim, a Secção 7 corresponde aos anexos referenciados ao longo da dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

As caldas de cimento são uma mistura homogénea de cimento e água, e eventualmente de aditivos [1], nas quais a composição a adoptar – que determinará as suas propriedades e desempenho – depende da funcionalidade que se pretende na sua aplicação [3]. As caldas têm um vasto domínio de aplicação em obras de engenharia, no entanto o âmbito desta dissertação incidirá no estudo das caldas de cimento que se destinam a aplicar em obras de geotecnia. Nestes casos, a composição da calda também deverá ter em consideração as características do terreno onde vai ser injectada.

Neste capítulo descrevem-se as potenciais aplicações e funções das caldas em obras de geotecnia (secção 2.1); referem-se as suas principais características (secção 2.2) e composições típicas destes materiais (secção 2.3), bem como a sua forma de preparação (secção 2.4); e finalmente mencionam-se os requisitos estabelecidos pelas duas normas em vigor (NP EN 447:2008 [4] e REBAP [2]) para as propriedades mais importantes para avaliação e previsão de desempenho e durabilidade das caldas (secção 2.5). Embora os requisitos destas propriedades só estejam estabelecidos para as caldas a utilizar nas injeções de bainhas para armaduras de pré-esforço – pela norma NP EN 447:2008 [4] e pelo artigo 169º do Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP) [2] – e não haja regulamentação para caldas que se destinam a obras de geotecnia, os valores especificados e forma de ensaio daqueles documentos normalizadores são usados como referência e comparados, em concordância aliás com os objectivos estabelecidos para este trabalho.

Por fim, descreve-se uma obra da empresa RODIO onde foi desenvolvida uma fase da campanha experimental *in situ* deste estudo para tentar correlacionar os valores das propriedades das caldas preparadas em obra relativamente aos que se obtêm com as caldas preparadas no laboratório.

2.1 APLICAÇÃO E FUNÇÃO DE CALDAS DE CIMENTO EM OBRAS DE GEOTECNIA

No domínio da geotecnia as caldas são utilizadas nomeadamente na execução de microestacas (secção 2.1.1) e ancoragens (secção 2.1.2), e ainda em técnicas de melhoria de solos como é o caso do *Jet Grouting* (secção 2.1.3), com as seguintes principais funções [5, 6, 7]:

- transferir a carga aplicada nas zonas seladas das ancoragens e microestacas para o solo;
- proteger da corrosão as armaduras de aço das ancoragens e das microestacas;
- melhorar as características resistentes e de deformabilidade do solo;
- diminuir a permeabilidade do solo, preenchendo os vazios que possam consentir a passagem de água.

2.1.1 Microestacas

As microestacas podem ser utilizadas em vários trabalhos dentro do domínio da geotecnia, destacando-se os seguintes: reforço de fundações de elementos existentes, fundações de elementos estruturais de edifícios ou pontes e cortinas de contenção de terrenos [6].

O processo construtivo de execução de microestacas envolve as seguintes quatro fases [6, 8]:

- (1) Perfuração – consiste na perfuração do terreno até à cota de profundidade estabelecida no projecto, e que pode ser realizada através de muitos sistemas de furação, dependendo do tipo de terreno, do diâmetro que se pretende ou até da disponibilidade das máquinas para a sua execução;
- (2) Colocação da armadura – que consiste na colocação de tubos de aço (Figura 2.1), cuja parte inferior tem furos com uma secção de cerca de 2 cm^2 e afastados com uma distância entre si de cerca de 100 cm, no interior do furo no terreno, garantindo que fica centrada. Esta colocação pode efectuar-se manualmente ou com auxílio de um equipamento de elevação de cargas

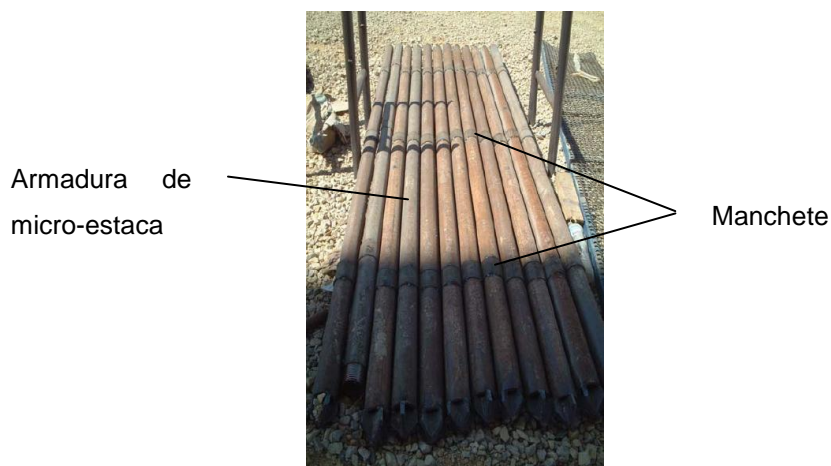
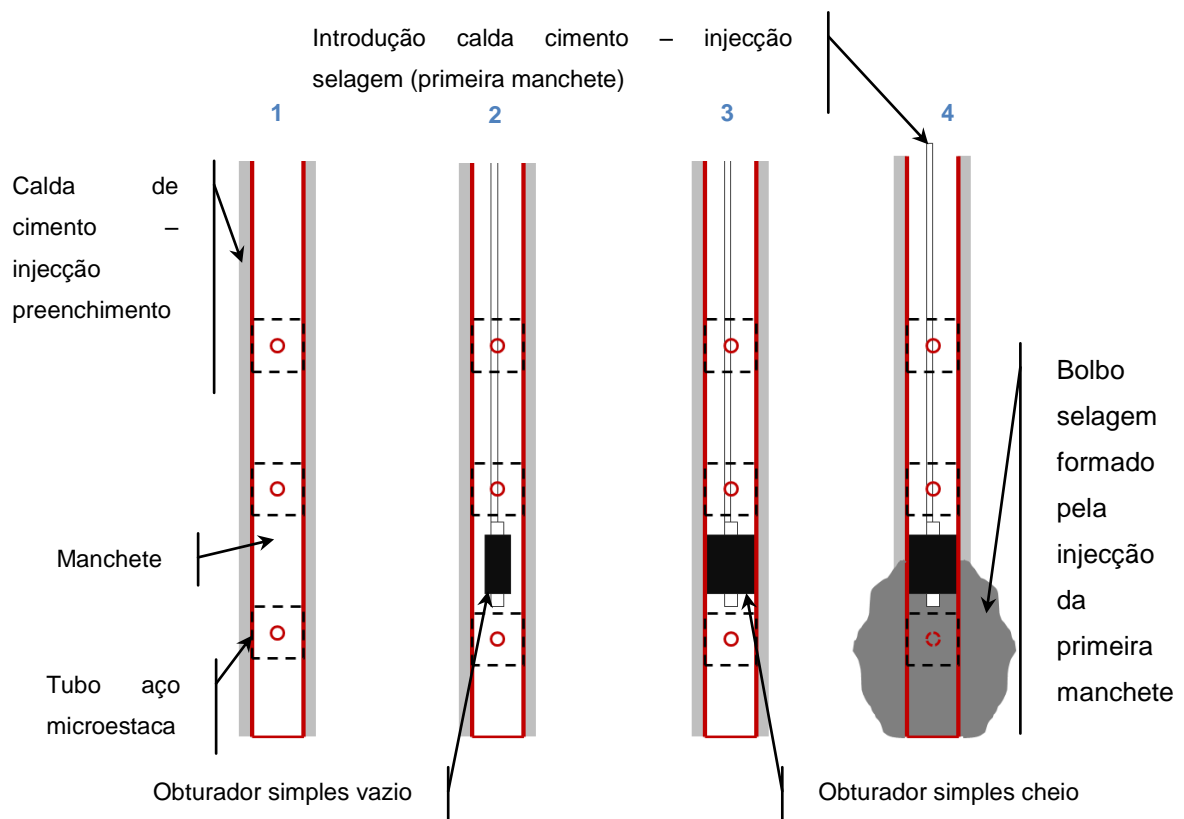


Figura 2.1 – Tubos de aço que constituem a armadura das microestacas [adaptado de 8].

- (3) Injecção de preenchimento – que consiste no preenchimento com calda do espaço entre as paredes do furo e a superfície exterior do tubo de aço. Para o efeito é colocado um tubo de injeção até ao fundo do furo, de forma a que a injeção seja feita de baixo para cima;
- (4) Injecção de selagem – que consiste na formação de um bolbo de selagem entre as paredes do furo e a superfície exterior do tubo de aço, e garante à microestaca uma maior aderência ao terreno. Esta injeção realiza-se através de mangas de borracha, que se denominam manchetes, e que se encontram a envolver os tubos de aço na zona dos furos que se encontram na parte inferior das microestacas (Figura 2.1). Para a injeção de selagem recorre-se à tecnologia denominada Injecção Repetitiva Selectiva (IRS), que se encontra esquematizada na Figura 2.2 e que consiste na realização da injeção de forma ascendente, por cada manchete, utilizando obturadores simples para a injeção da primeira manchete, e obturadores duplos para a injeção das restantes manchetes. Os obturadores (Figura 3.21) são equipamentos que são colocados entre a manchete que se pretende injectar. Depois de devidamente posicionados no interior da microestaca são cheios com água à pressão, constituindo assim um tampão dentro da microestaca, permitindo apenas a injeção da manchete que está entre os obturadores. A injeção de selagem é efectuada entre o primeiro e o quarto dia após a injeção de preenchimento.



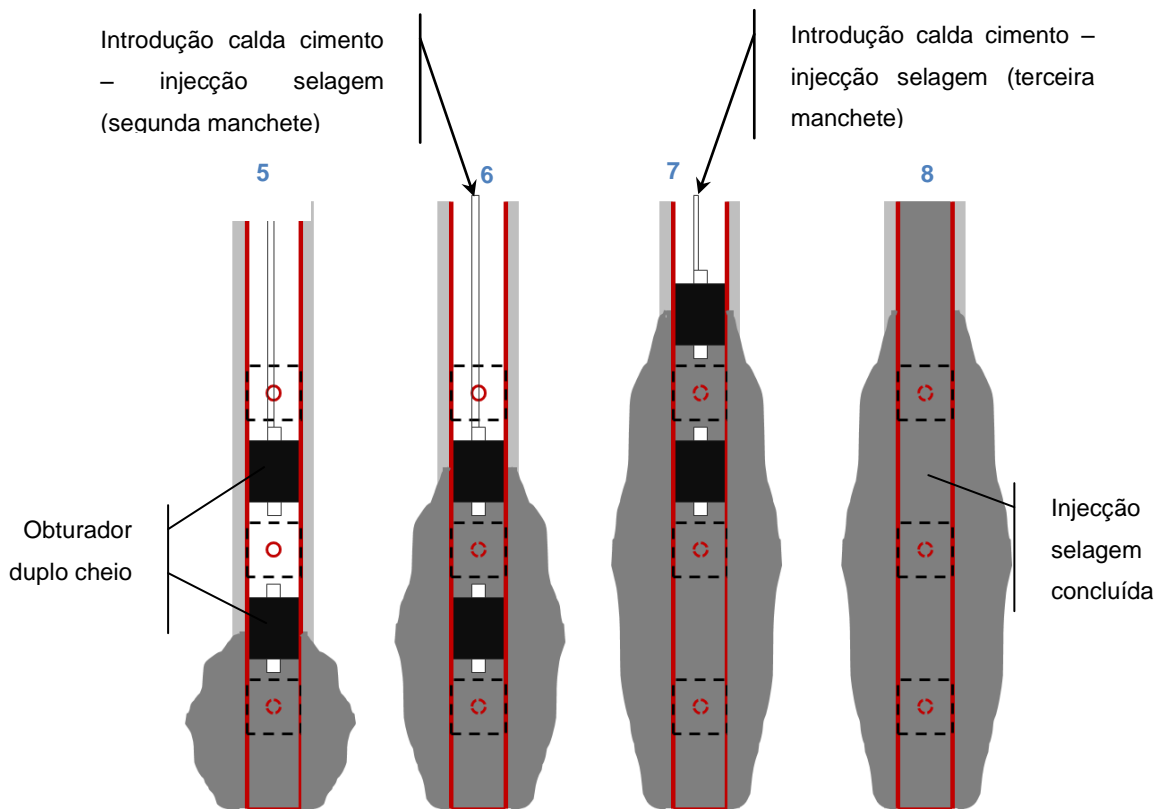


Figura 2.2 – Esquema em perfil de injeção selagem de uma microestaca através da tecnologia de Injeção Repetitiva Selectiva (IRS).

Na campanha experimental realizada neste trabalho foi simulada a preparação de microestacas, mas fora do meio de confinamento do terreno (segundo o protocolo que se encontra sistematizado na secção 3.6.5), com o objectivo de correlacionar os valores da tensão de rotura das caldas de cimento ao nível do bolbo de selagem de recobrimento das microestacas e os valores da resistência à compressão das mesmas caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos.

2.1.2 Ancoragens

As ancoragens são elementos estruturais utilizados em trabalhos de geotecnia, nomeadamente em trabalhos de contenção de solos, tais como: paredes de Berlim, paredes moldadas e pré-suporte de túneis.

Usualmente, a constituição de uma ancoragem é feita pela associação de cordões de aço em volta de uma bainha (Figura 2.3), formando cabos de ancoragem, que são colocados nos furos previamente executados no terreno e com um comprimento que cumpra o estipulado nos respectivos projectos.

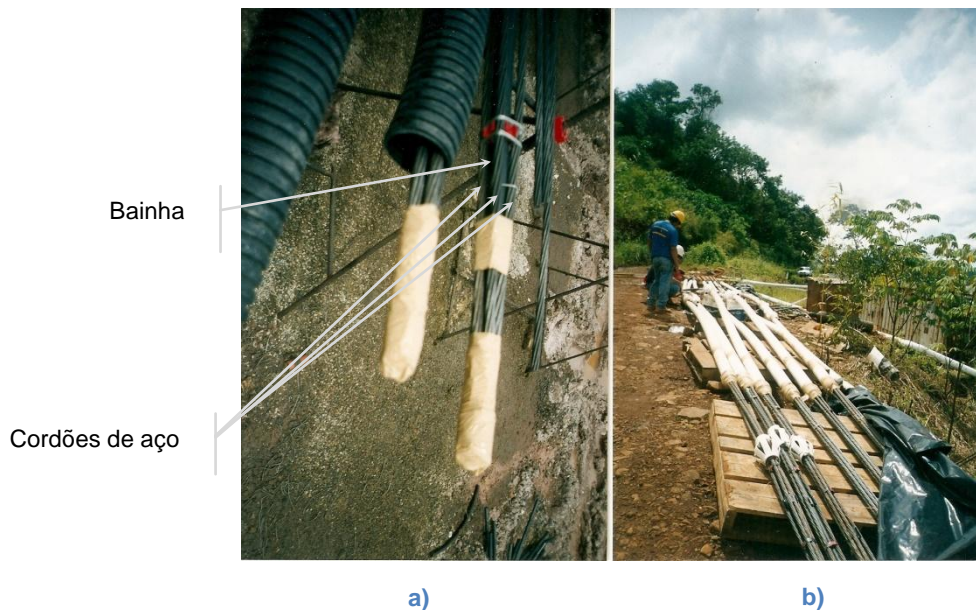


Figura 2.3 – a) Pormenor de um cabo de ancoragem; b) Cabos de ancoragem [arquivo RODIO Portugal SA.].

A execução da ancoragem pode ser feita por diversos métodos, cuja escolha é feita consoante o tipo de solo, zona de execução, economia ou até mesmo segundo a disponibilidade do equipamento na altura da execução. Contudo, o procedimento é, normalmente, constituído por cinco fases [9]:

- (1) Perfuração – consiste na perfuração do terreno até à cota estabelecida no projecto, e que pode ser efectuada por diversos equipamentos mecânicos, dependendo do tipo de solo a perfurar, dos condicionalismos da envolvente da obra ou até mesmo da disponibilidade do equipamento na altura da execução da obra;
- (2) Injecção primária – consiste no preenchimento do furo com calda de cimento com uma razão A/C típica entre os 0,4 e 0,5, dependendo do tipo de solo e possuindo a fluidez necessária para que sejam garantidas tanto as exigências funcionais durante a vida útil da ancoragem, como a sua aplicabilidade durante a injeção, impedindo que o equipamento não fique entupido;
- (3) Introdução do cabo de ancoragem – consiste na colocação do cabo de ancoragem no interior do furo preenchido com calda de cimento, logo após a injeção primária;

- (4) Injecção secundária – consiste na criação de um bolbo de amarração, com a finalidade de garantir uma selagem e aderência eficaz da ancoragem ao solo. Para esse efeito não existe tanta preocupação em que a calda garanta uma determinada resistência, pretendendo-se essencialmente que tenha uma fluidez suficiente para escoar na bainha e que passe nos orifícios que esta contém na zona de amarração, comprimindo a calda primária contra o solo e criando consequentemente um bolbo que permite a selagem da ancoragem;
- (5) Aplicação de pré-esforço – quando a calda de cimento tiver atingido uma resistência superior a 15 MPa é aplicado o pré-esforço nas ancoragens.

2.1.3 Jet Grouting

O *Jet Grouting* é uma técnica possível de melhoria de solos realizada directamente no interior do terreno sem escavação prévia que consiste na injeção de caldas de cimento em solos, a pressões elevadas, com o objectivo de aumentar a respectiva capacidade resistente, bem como diminuir a sua deformabilidade e/ou permeabilidade. Esta técnica tem aplicabilidade em trabalhos tais como: contenção de escavações, reforço de fundações, cortinas de estanquidade e estabilização de taludes [10].

A pressão a que é injectada a calda permite a desagregação da estrutura natural do terreno e, simultaneamente, a mistura da calda de cimento com as partículas de solo desagregado, dando origem a um material de melhores características mecânicas e menor permeabilidade.

O procedimento de execução do Jet Grouting envolve as seguintes fases: (Figura 2.4):

- (1) Furação: colocação de uma sonda até à cota de projecto (Figura 2.4 a));
- (2) Injecção: jactos horizontais de calda de cimento através da sonda colocada no interior do terreno (Figura 2.3 b)). A sonda vai subindo à medida que a injeção da calda se procede, formando a coluna de *Jet Grouting* (Figura 2.4 c));
- (3) Selagem: finalização da injeção com selagem do furo, seguindo-se a repetição de todo o processo, até se atingir o número de colunas pretendidas (Figura 2.4 d)).

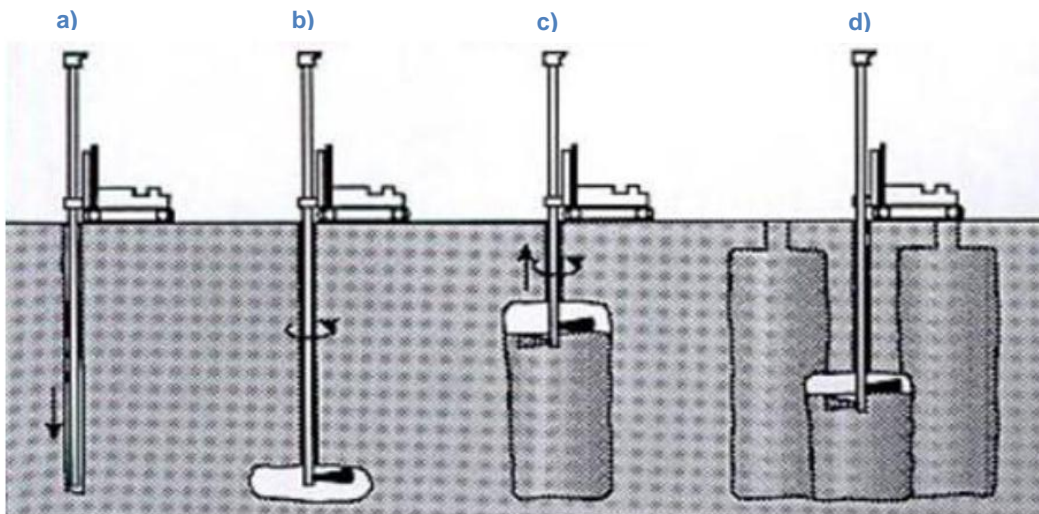


Figura 2.4 – Fases de execução do Jet Grouting: a) perfuração; b) injeção de calda; c) subida da sonda e formação da coluna; d) selagem e repetição do processo [adaptado 7].

2.2 CARACTERÍSTICAS DAS CALDAS DE CIMENTO

As caldas de cimento para desempenharem convenientemente a função a que se destinam, é importante que sejam tidas em conta algumas características, das quais se destacam as seguintes [5; 9; 11; 12]:

- fluidez / trabalhabilidade
- exsudação
- teor em ar
- durabilidade
- resistência mecânica

2.2.1 Fluidez / trabalhabilidade

A fluidez das caldas de cimento influencia a sua injectabilidade – i.e., a sua facilidade de colocação em obra – e o processo de aplicação nomeadamente, o eventual entupimento do equipamento de injeção [12]. Neste sentido, a calda deve ter a consistência máxima desde que assegure em simultâneo uma boa injectabilidade.

O aumento da fluidez das caldas, que apresenta vantagens e desvantagens, pode ser efectuado com a introdução de água na mistura ou com a introdução de aditivos destinados a esse fim. As desvantagens associadas ao aumento da fluidez, são [11, 12]:

- aumento da exsudação (secção 2.2.2), que poderá promover a corrosão do aço de ancoragens e microestacas, ou até mesmo o congelamento da água, no caso de se estar perante condições atmosféricas que o permitam;
- diminuição do volume da calda de cimento e aumento da retracção durante o processo de endurecimento, provocada pela quantidade de água perdida por evaporação no processo de cura, podendo originar, por exemplo, uma insuficiente protecção da armadura de ancoragens e microestacas;
- diminuição da resistência mecânica da calda no seu estado endurecido, fazendo com que as exigências necessárias para a funcionalidade e segurança dos trabalhos onde são aplicadas não seja totalmente garantida.

Por outro lado, as principais vantagens associadas ao aumento da fluidez das caldas, fundamentais a determinadas aplicações, são [12]:

- o aumento da penetrabilidade, que pode por exemplo facilitar o preenchimento de vazios dos solos, em trabalhos que se destinam à diminuição da permeabilidade do terreno ou do aumento da sua capacidade resistente;
- mitiga a probabilidade dos equipamentos de injeção entupirem.

2.2.2 Exsudação

A exsudação consiste na quantidade de água que reflui à superfície ao fim de 3 horas [4] de repouso da calda de cimento, impedindo a evaporação da água essencial à hidratação do cimento. A exsudação das caldas deve ser suficientemente baixa para evitar a segregação e a sedimentação dos materiais.

As caldas até serem injectadas devem ser mantidas em constante agitação para que não sofram um processo segregação e sedimentação (para esse efeito as caldas são colocadas na segunda cuba do equipamento de mistura – secção 2.3), mantendo-se homogéneas e permitindo assim que possuam características uniformes. Uma forma de evitar este fenómeno é reduzir ao máximo o tempo que separam as etapas de preparação e injeção das caldas de cimento [12].

2.2.3 Teor em ar

O teor em ar consiste nos vazios que se formam pela entrada de ar na calda de cimento. A presença de ar no interior das caldas é originada, principalmente, pelo

processo de mistura e na incapacidade das bolhas de ar que se formam flutuarem até à superfície, expelindo o ar [13].

O teor de ar introduzido nas caldas actua de forma desfavorável em relação às resistências mecânicas. O ar que fica no interior das caldas no seu estado fresco, não sendo removido, origina vazios quando atingem o estado endurecido. Estas zonas porosas aumentam a fragilidade do material, diminuindo assim a sua capacidade resistente.

2.2.4 Durabilidade

A durabilidade é uma característica importante que se deve ter em conta nas caldas de cimento, na medida em que estas devem cumprir as suas exigências funcionais durante todo o período de vida útil para a qual é projectada a obra a que se destinam. Nesse sentido, qualquer calda preparada com uma qualidade deficiente poderá originar danos que afectam as suas propriedades, ficando comprometida a sua durabilidade.

A durabilidade é uma característica influenciada inevitavelmente pela agressividade química dos terrenos em relação às caldas, mas também pelo tipo de cimento, razão A/C e a porosidade da mistura [5].

A razão A/C é um factor que influencia directamente as características das caldas de cimento. No caso da durabilidade, um aumento da razão A/C, e portanto, um aumento da quantidade de água em relação à quantidade de cimento, poderá provocar uma maior retracção, originando fissuras que tornam a armadura de aço mais acessível à água e aos agentes químicos constituintes do terreno.

A porosidade que as caldas de cimento apresentam no seu estado endurecido, provocada eventualmente pela introdução de ar através do processo de mistura, é um factor que induz uma diminuição da resistência mecânica, originando uma diminuição da durabilidade das caldas.

2.2.5 Resistência mecânica

A resistência mecânica das caldas de cimento está relacionada com a capacidade desta resistir a esforços internos ou externos de diversas origens, que ocorrem no próprio período de cura ou através de cargas estáticas ou dinâmicas que actuam sobre si [11]. As caldas de cimento deverão ser capazes de acompanhar as deformações provocadas pelos esforços a que estão sujeitas, garantindo assim uma

resistência mecânica adequada para não comprometer as funcionalidades e as exigências pretendidas para a obra a que se destinam.

Esta característica das caldas depende essencialmente de dois factores: o tipo de matriz do material cimentício e o tipo de estrutura porosa [11]. O primeiro factor está relacionado com o tipo de cimento utilizado e a forma como se procedeu a cura da calda. O segundo está relacionado com a densidade da calda. Quanto menor é a densidade do material maior é a sua porosidade, constituindo descontinuidades no material que reduzem a sua capacidade resistente.

A resistência mecânica pode ser correlacionável com a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas. As fissuras e a porosidade que as caldas poderão apresentar no seu interior, são descontinuidades que alteram a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, reflectindo assim, indirectamente, o estado de conservação das caldas e a densificação da matriz do material cimentício. A razão A/C é o principal factor que influencia o desenvolvimento da porosidade das caldas, podendo desenvolver o aparecimento de fissuras. O aumento da razão A/C significa que as caldas são preparadas com uma quantidade superior de água em relação à quantidade de cimento. Este facto conduz ao desenvolvimento da fendilhação da calda durante o processo de cura, como o desenvolvimento de uma matriz do material cimentício menos densa, originando um aumento da porosidade que pode levar ao aparecimento de fissuras. A fendilhação e a porosidade das caldas estão directamente relacionadas com a sua resistência mecânica, uma vez que o seu aumento reduz a sua capacidade resistente. A velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas diminui ao passar por zonas porosas do material. Desta forma, pode-se estimar a resistência mecânica das caldas de cimento através da avaliação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.

A determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas é um método que tem a vantagem de ser não destrutivo, permitindo avaliar a resistência mecânica dos materiais, sem a necessidade de os deteriorar ou até mesmo destruir [11; 14]. A importância desta correlação (que ainda não se dispõe para as caldas de cimento) destaca-se no sentido de contribuir para a estimativa da resistência mecânica de uma calda, por exemplo, em obra, curada em provetes, antes de ser transportada para laboratório para ser avaliada a sua resistência mecânica. Poderá, desta forma, permitir uma economia de tempo no controlo de qualidade das caldas de cimento.

2.3 COMPOSIÇÃO DAS CALDAS DE CIMENTO EM GEOTECNIA

2.3.1 Razão A/C

Na generalidade dos trabalhos de geotecnia, a razão A/C, em massa, utilizada na preparação das caldas varia entre 0,4 e 1,0 [3; 6; 8; 10].

A quantidade de água a utilizar deve ser racionalizada e bem medida tendo em conta a função da calda a produzir, já que é um factor importante que influencia as características das caldas. A água utilizada na mistura deve ser suficiente para garantir a fluidez (secção 2.2.1) necessária à injeção da calda, mas não deve ser muito elevada para evitar a exsudação (secção 2.2.2) durante o processo de cura [5]. A resistência à compressão é outra propriedade que é influenciada com a variação da razão A/C, diminuindo o seu valor à medida que a quantidade de água aumenta em relação à quantidade de cimento na mistura. Quando usada em excesso na preparação de caldas, a água poderá provocar um aumento do volume de vazios resultante da sua evaporação durante a cura da calda, o que poderá provocar também uma diminuição da resistência mecânica [11].

Desde o início do século XX que se encontra reportado que a razão A/C é o factor principal que influencia as propriedades dos materiais à base de cimento – betões e argamassas, nomeadamente a resistência mecânica, que diminui com o aumento da razão A/C [15; 16; 17], devido ao correspondente aumento progressivo da porosidade que conduz a um enfraquecimento da matriz à base de cimento.

A proporcionalidade inversa entre a resistência mecânica e a razão A/C foi a principal conclusão obtida por Abrams, num extenso trabalho de pesquisa experimental por ele desenvolvido, sobre a relação entre a resistência à compressão dos betões e a razão A/C. Esta conclusão tem sido descrita como o mais significativo avanço na história dos materiais cimentícios, que foi enunciada como lei de Abrams desde 1918, para o betão. Nesse sentido, e dada a inexistência de bibliografia que reporte a generalização da lei de Abrams para as caldas de cimento, no presente trabalho será desenvolvida a correlação entre a resistência à compressão e a razão A/C de caldas.

2.3.2 Cimento

O cimento habitualmente usado na preparação de caldas para aplicar em obras de geotecnia é do tipo Portland de calcário CEM II/B – L 32,5 N [informação oral Eng^o. André Martins]. Este tipo de cimento, que inclui na sua constituição entre 65% e 79%

de clínquer Portland, 21% a 35% de “filler” calcário e 0% a 5% de outros constituintes [18], garante o cumprimento das funções a que se destinam as caldas de cimento em trabalhos de geotecnia (secção 2.1). Contudo, em casos específicos, como em obras de maior complexidade, dimensão ou se tratar de uma exigência de projecto, utiliza-se cimento com uma classe de resistência de 42,5 MPa.

O cimento utilizado para a preparação de uma calda de cimento deve ser produzido na menor janela temporal possível em relação à sua utilização e, mesmo assim, deve garantir-se o seu armazenamento nas condições adequadas para minimizar reacções de hidratação prematuras que conduzem à aglomeração de partículas de cimento – formação de grumos – que prejudicam as reacções de hidratação que devem ocorrer na fase de cura e endurecimento das caldas [5]. Em obra, estes fenómenos são mais frequentes por ser mais difícil o armazenamento cuidado dos sacos de cimento. De forma a evitar esses fenómenos, o cimento deve ser colocado em local seco, coberto por uma lona plástica para o proteger das condições atmosféricas, e afastado do chão ou de qualquer outro elemento que lhe possa induzir humidades.

2.3.3 Água

A água é o elemento necessário a introduzir na preparação da calda para, em resultado da sua reacção química com o cimento, se formarem uma série de compostos químicos hidratados capazes de conferir resistência mecânica ao sistema água-cimento.

A composição química da água pode afectar as propriedades e desempenho das caldas, uma vez que podem estar presentes compostos que afectem a quantidade do cimento e da capacidade resistente do aço utilizados nos trabalhos de geotecnia [5]. Em obra normalmente usa-se água da rede pública para a mistura das caldas de cimento, captada no ponto disponível para esse efeito.

2.3.4 Aditivos

Na preparação das caldas de cimento pode adicionar-se compostos orgânicos (num teor que não deverá exceder 1%, em massa) para otimizar algumas das suas propriedades como por exemplo, a fluidez (secção 2.2.1) e a exsudação (secção 2.2.2) [5].

2.4 PREPARAÇÃO DE CALDAS

O procedimento de preparação de caldas é um factor que influencia as suas propriedades, e neste trabalho pretende-se fazer uma análise de sensibilidade às variáveis de preparação das caldas em laboratório e *in situ*, com o objectivo compreender o efeito de variações no procedimento de preparação das caldas na dispersão dos resultados dos ensaios das caldas de cimento.

Uma das variáveis estudadas na preparação de caldas foi a influência do equipamento de mistura. A preparação de caldas em laboratório pode ser efectuada, recorrendo-se a dois tipos de equipamentos mecânicos – misturador de pá ou misturador de hélice – que foram também utilizados na preparação de caldas estudadas no presente trabalho em laboratório, com o objectivo de analisar a influência da variação do equipamento de preparação de mistura das caldas, nos resultados dos ensaios das caldas.

Na preparação de caldas de cimento em obra recorre-se tipicamente a um equipamento especial, que dispõe de duas cubas.

- numa das cubas é preparada a calda introduzindo os constituintes da calda, pela seguinte ordem: água, cimento e depois, se for esse o caso, aditivo(s). Esta cuba dispõe de um contador de litros que permite quantificar a água introduzida, sendo a quantidade adicionada de cimento contabilizada ao saco de cimento. A mistura subsequente dos constituintes é efectuada através da rotação de pás, que esta cuba dispõe, garantindo assim a preparação de uma calda homogénea, sem grumos.
- Depois de preparada, a calda é transferida para a outra cuba, onde é conservada em agitação (para evitar fenómenos de decantação), até ser injectada.

Em casos excepcionais, como o Jet Grouting, em que as quantidades de calda a injectar são entre 5 a 10 vezes superiores à maioria das outras aplicações em obras de geotecnia, o processo de fabrico é idêntico, em todo o caso obriga a que se utilizem equipamentos de maior capacidade, tanto a nível de preparação da calda como de armazenamento e injeção, de forma a garantir não só as exigências que se pretendem para as caldas, mas também para garantir a continuidade do processo construtivo, sem interrupção da injeção.

O tempo de mistura, o tipo de misturador e os procedimentos de mistura são factores que influenciam as propriedades das caldas de cimento [19; 20]. Por esse facto, a

preparação das caldas deve ser efectuada por pessoal especializado e habituado a utilizar o equipamento.

As caldas de cimento podem ainda ser produzidas industrialmente (caldas prontas) e entregues em obra devidamente acondicionadas. Esta vertente de produção das caldas de cimento optimiza a qualidade das caldas na medida em que são preparadas misturas mais consistentes e com maior controlo [5].

2.5 NORMALIZAÇÃO

O controlo de qualidade das caldas de cimento deve ser sempre considerado para que as suas características (secção 2.2) sejam sempre asseguradas, de modo a cumprirem as funções para as quais são desenvolvidas e aplicadas (secção 2.1).

A adequação da calda de cimento à função a que se destina – em termos de facilidade de aplicação, desempenho em serviço e durabilidade – é, principalmente, avaliada pela determinação de propriedades que se discriminam a seguir [21]:

- Fluidez;
- Exsudação;
- Variação de volume;
- Resistência mecânica;
- Tempo de presa;
- Massa volúmica;

Os requisitos que as propriedades das caldas, acima referidas, devem satisfazer estão estabelecidos para as caldas a utilizar na injeção de bainhas para armaduras de pré-esforço na norma NP EN 447: 2008 [4]. O Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP) [2], apenas estabelece requisitos em relação à resistência mecânica de caldas a utilizar na injeção de bainhas para armaduras de pré-esforço. Estas regulamentações são significativamente diferentes no que respeita ao pormenor das especificações impostas e dos seus valores, bem como no que respeita às exigências da composição, do procedimento de mistura da calda e dos métodos de ensaio.

Na Tabela 2.1 apresenta-se uma análise comparativa das duas referências normativas.

Tabela 2.1 – Estudo comparativo entre as normas NP EN 447:2008 [4] e REBAP [2] (para caldas de injeção de bainhas para armaduras de pré-esforço) no que respeita ao modo de preparação e requisitos que as suas propriedades devem satisfazer.

		NP EN 447: 2008	REBAP
a) Propriedades	Fluidez	<p>- imediatamente após a mistura:</p> <p>ensaio do cone: $t_0 \leq 25$ s</p> <p>espalhamento da calda: $a_0 \geq 140$ mm</p> <p>- 30 minutos após a mistura</p> <p>ensaio do cone: $1,2.t_0 \geq t_{30} \geq 0,8.t_0$; $t_{30} \leq 25$ s</p> <p>espalhamento da calda: $1,2.a_0 \geq a_{30} \geq 0,8.a_0$; $a_0 \geq 140$ mm</p> <p>Sendo:</p> <p>t - tempo (s)</p> <p>a - espalhamento médio (mm)</p>	nada refere
	Exsudação	<p>- método do tubo inclinado: $e \leq 0,3\%$, após 3 h em repouso</p> <p>- método da mecha: $\dot{e} \leq 0,3\%$, após 3 h em repouso (\dot{e} - média de 3 valores de exsudação)</p>	apenas refere que esta é uma característica que pode ter interesse em alguns casos
	Variação de Volume	<p>-1% (retração) < ΔV < +5% (expansão)</p> <p>Sendo:</p> <p>ΔV - variação volume</p>	apenas refere que esta é uma característica que pode ter interesse em alguns casos
	Resistência à compressão	<p>≥ 30 MPa, aos 28 dias</p> <p>≥ 27 MPa, aos 7 dias (quando se pretende estimar a resistência provável aos 28 dias, a partir da resistência aos 7 dias)</p> <p>- avaliado em provetes paralelepípedicos com dimensões 40 x 40 x 160 [mm³]</p>	<p>≥ 17 MPa, aos 7 dias</p> <p>(em provetes cúbicos com 100 mm de aresta)</p>
	Tempo de Presa	<p>início de presa ≥ 3 horas</p> <p>fim de presa ≤ 24 horas</p>	nada refere
	Massa Volúmica	medida de acordo com o método da Norma NP EN 196-3:2006	nada refere
b) Preparação das caldas	Tempo de amassadura	nada refere	≤ 5 minutos
	Razão A/C	$\leq 0,44$	tão baixa quanto possível

A norma NP EN 447:2008 [4] e o REBAP [2] são duas regulamentações que se encontram em vigor e adoptadas como referência para o controlo de qualidade das caldas de cimento para trabalhos em geotecnia, dada a inexistência de regulamentações específicas para caldas com aplicação específica em geotecnia.

Actualmente, o controlo de qualidade às caldas de cimento imposto pelos cadernos de encargo começam a referir os requisitos da norma NP EN 447:2008 [4] como os valores que as caldas devem satisfazer. No entanto, a grande maioria dos cadernos de encargo referem os valores estabelecidos pelo REBAP como os valores

admissíveis a cumprir no controlo de qualidade efectuado às caldas em obras de geotecnia.

Como se sabe, a curto/médio prazo o REBAP [2] deixará de ser uma regulamentação em vigor, pelo que a importância de um estudo comparativo e a avaliação dos resultados obtidos em função da realização dos ensaios das caldas de acordo com as duas normas em vigor – NP EN 447:2008 [4] e o REBAP [2] – é de todo pertinente.

Os valores admissíveis e os métodos de ensaio de avaliação da resistência mecânica das caldas, são os que apresentam diferenças mais significativas em relação às duas normas referidas, como se pode verificar na Tabela 2.1. Segundo a norma NP EN 447:2008 [4] a resistência mecânica das caldas de cimento deve ter um valor não inferior a 30 MPa aos 28 dias de idade da calda, avaliada em provetes paralelepípedicos de dimensões 40 x 40 x 160 [mm³]. O REBAP [2] estabelece para a resistência mecânica das caldas um valor que não deve ser inferior a 17 MPa aos 7 dias de idade da calda, avaliada em provetes cúbicos com dimensões 100 x 100 x 100 [mm³].

No estudo efectuado por Taryal e Chowdhury [22] é analisada a relação entre as resistências do cimento avaliadas segundo duas normas distintas (*British Standard Cube Test; ISSO-RILEM prism test*), em que uma estabelece a determinação da resistência mecânica do cimento em provetes paralelepípedicos e outra refere a determinação da resistência mecânica do cimento através de provetes cúbicos. No entanto, a composição da argamassa estabelecida por estas duas normas para a avaliação da resistência mecânica do cimento também difere consoante a norma. Neste sentido, Taryal e Chowdhury [22] analisam a correlação da resistência do cimento avaliada segundo duas normas diferentes e não a influencia da geometria dos provetes nos valores das resistências do cimento.

No presente estudo será efectuado o estudo das resistências de caldas com a mesma composição, mas curadas em provetes com geometria diferente (paralelepípedicos – NP EN 447:2008 [4]; cúbicos – REBAP [2]). Pretende-se com este estudo analisar a correlação existente entre os valores das resistências de caldas curadas em provetes com geometria diferente estabelecidos pelas duas normas em vigor, e verificar a relação existente entre esses valores, de forma a avaliar a possibilidade de se poder determinar o valor da resistência da calda curada em provetes paralelepípedicos, através do valor obtido da resistência de caldas curadas em provetes cúbicos, e vice-versa.

2.6 OBRA DA RODIO ACOMPANHADA NO DESENVOLVIMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Numa das fases da campanha experimental desenvolvida neste trabalho foi feito o acompanhamento de preparação de caldas de cimento a utilizar numa obra da RODIO. O âmbito desta fase centra-se na importância de avaliar a reprodutibilidade dos valores das resistências mecânicas das caldas de cimento produzidas em ambiente de obra e a comparação desses resultados com os obtidos em caldas preparadas em laboratório.

A obra referida localizava-se no concelho da Amadora e à RODIO competia a selagem de perfis metálicos e a colocação de ancoragens em avanço, para posterior construção de um muro de Berlim com dois níveis, ao longo de todo o perímetro da obra. A construção do muro de Berlim não foi efectuada pela RODIO.

As caldas de cimento a utilizar tanto na selagem dos perfis como nas injeções das ancoragens tinham como estabelecido serem constituídas por uma razão A/C de 0,5. Os constituintes utilizados foram apenas cimento e água. O cimento usado foi Portland de calcário CEM II/B – L 32,5 N produzido pela empresa Secil, e a água foi captada da rede pública. A preparação das caldas de cimento foi efectuada no misturador mecânico denominado UNIGROUT (Figura 3.5), cujas características estão descritas na secção 3.4. O protocolo de preparação das caldas com este equipamento nesta obra encontra-se sistematizado na Tabela 3.3.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

O plano de ensaios experimentais foi concebido para, numa primeira fase, incluir um estudo no laboratório, de avaliação da sensibilidade das propriedades das caldas de cimento, em relação a variações no procedimento da sua preparação. Nomeadamente, prepararam-se caldas com a mesma composição de A/C, variando a natureza do misturador mecânico empregue e a sequência de introdução dos constituintes no misturador. Os procedimentos de preparação das caldas estão descritos nas secções 3.3.2 e 3.3.3 e os resultados obtidos encontram-se sistematizados na secção 4.1.

Posteriormente, pretendeu-se: (i) correlacionar os valores das propriedades no estado fresco (massa volúmica, teor em ar e tempo de presa) e (ii) os resultados de resistência mecânica e de velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas que se obtêm no estado endurecido das caldas, com a razão A/C utilizada na preparação da calda. Este estudo incluiu também (iii) a avaliação da reprodutibilidade dos resultados de resistência mecânica e velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, com a forma geométrica dos moldes dos provetes que, as diferentes normas de ensaio recomendam para a avaliação de propriedades de caldas, i.e. paralelepípedicos (NP EN 445:2008 [1]) e cúbicos (REBAP [2]).

Neste sentido, prepararam-se no laboratório (secção 3.3) caldas, com o mesmo cimento das anteriores, variando sistematicamente a razão A/C entre 0,4 e 1,0, com incrementos de 0,1, para as quais se determinaram os valores daquelas propriedades, no estado fresco e endurecido. Os resultados obtidos encontram-se sistematizados na secção 4.1.

Com o objectivo de comparar os resultados da resistência mecânica de caldas preparadas *in situ* e no laboratório, moldaram-se, também, provetes paralelepípedicos e cúbicos, utilizando caldas que foram preparadas numa obra que a RODIO tinha em curso (secção 2.8). Nestas caldas, utilizou-se o mesmo tipo de cimento do que foi usado nas caldas preparadas no laboratório, a razão A/C foi 0,5 e o procedimento de mistura encontra-se descrito na secção 3.4, em que foi utilizado um equipamento de mistura denominado UNIGROUT (Figura 3.4). Os resultados obtidos nos ensaios de determinação das resistências mecânicas encontram-se sistematizados na secção 4.2.

Finalmente, pretendeu-se correlacionar a resistência mecânica de caldas moldadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos com a tensão de rotura das mesmas caldas ao nível do bolbo de selagem de recobrimento das microestacas. Neste sentido, prepararam-se duas caldas *in situ* (instalações da RODIO), recorrendo ao mesmo tipo de cimento do utilizado nas caldas anteriormente preparadas, e com razão A/C igual a 0,5. Na preparação de cada uma destas caldas usou-se um misturador mecânico diferente: para uma foi utilizado o equipamento mecânico denominado UNIGROUT, anteriormente utilizado na preparação de caldas *in situ*, na obra da RODIO referida na secção 1.8, e a outra foi preparada utilizando uma betoneira tradicional (Figura 3.7), cujo procedimento de amassadura se encontra na secção 3.5. Com estas caldas moldaram-se provetes paralelepípedicos e cúbicos (secções 3.6.4 e 3.6.5, respectivamente), e simulou-se a execução de microestacas (secção 3.6.6). A determinação da resistência mecânica das caldas foi efectuada nos provetes moldados e a tensão de rotura das caldas ao nível do bolbo de selagem de recobrimento das microestacas através da injeção das manchetes. Os resultados apresentam-se sistematizados na secção 4.3.

Na Tabela 3.1 apresenta-se a sistematização do estudo paramétrico efectuada com as caldas preparadas neste trabalho, bem como as designações que lhes foram atribuídas. Globalmente, no Laboratório foram preparadas 59 caldas, 6 por cada razão A/C, com a excepção da razão 0,5, em que foram preparadas 23 caldas de cimento. *In situ*, na fase da campanha experimental desenvolvida na obra que a RODIO tinha em curso foram preparadas 9 caldas, e na outra fase *in situ*, desenvolvida nas instalações da RODIO, foram preparadas 2 caldas.

Neste capítulo descrevem-se os materiais e os equipamentos utilizados, bem como os procedimentos dos ensaios experimentais realizados.

3.2 CONSTITUINTES DAS CALDAS DE CIMENTO

O ligante adoptado em na campanha experimental foi cimento Portland de calcário CEM II/B – L 32,5 N produzido pela empresa Secil. Os lotes utilizados foram diferentes consoante a fase da campanha experimental: em laboratório utilizou-se um lote, nas caldas preparadas na obra utilizou-se outro, e nas que foram preparadas nas instalações da RODIO foi utilizado um lote diferente dos anteriores.

O tipo de cimento citado tem na sua constituição entre 65% e 79% de clínquer Portland, 21% a 35% de “filler” calcário e 0% a 5% de outros constituintes [18]. No

Anexo I apresenta-se uma ficha técnica, disponibilizada pela Secil, com os valores médios dos resultados do autocontrolo periódico efectuado às características deste tipo de cimento.

As condições de armazenamento do cimento até à sua utilização, para evitar que hidratasse prematuramente, diferiram consoante a fase da campanha experimental: no **laboratório** o cimento foi colocado em bidões metálicos com fecho estanque (Figura 3.1); **in situ**, os sacos de cimento foram empilhados ao ar livre protegidos com uma lona plástica até à sua utilização.



Figura 3.1 – Bidões metálicos de fecho estanque onde foi armazenado o cimento usado nas caldas preparadas no laboratório.

O constituinte líquido utilizado em todas as caldas foi água da rede pública, captada em diferentes pontos, onde as caldas foram preparadas: laboratório do ISEL, obra em curso da RODIO, na Amadora, e nas instalações da RODIO, na Abrunheira.

Tabela 3.1 – Resumo das caldas usadas neste trabalho.

Local Preparação Caldas	Razão A/C	Designação das caldas	Procedimento de Mistura						Ensaio Estado Fresco			Provetes Preparados		Ensaio Estado Endurecido						
			Misturador Mecânico				Análise da sensibilidade		Massa Volúmica	Teor em Ar	Tempo de Presa	Paralelipípedicos	Cúbicos	Idade (dias)	Provetes Paralelipípedicos			Provetes Cúbicos		Microestacas
			Pá	Hélice	UniGrout	Betoneira	Tempo de Mistura	Seq. int. constituintes							Resistência Mecânica Flexão	Resistência Mecânica Compressão	Ultra-sons (2)	Resistência Mecânica Compressão	Ultra-sons (2)	
Laboratório	0,5	LAB*(1)	x	x				x	x	x		x		2, 7, 28	x	x	x	x		
	0,4; 0,6 - 1,0				x							x	x			x	x	x		
In situ (Obra)	0,5	OB0.5			x									2, 7, 28	x	x		x		
In situ (Micro-estacas)	0,5	ME0.5			x	x						x	x	1, 2, 3, 4	x	x		x		x

(1) Em que * corresponde ao valor da razão água/cimento de 0,4 a 1,0.

(2) Não se obtiveram os resultados aos 28 dias, exceptuando os provetes preparados com caldas com razão A/C = 0,5.

3.3 PREPARAÇÃO DAS CALDAS NO LABORATÓRIO

3.3.1 Equipamento

Nas caldas preparadas no laboratório utilizaram-se dois tipos de equipamentos de mistura mecânica:

- Misturador de pá¹ (Figura 3.2 (a)), da marca Controls, modelo PL5M, com número de série 22062;
- Misturador de hélice (Figura 3.2 (b)), constituído por uma vareta de agitação que funciona como hélice acoplada a um berbequim da marca ELU, modelo BM21E.

A pesagem do cimento e da água para as caldas foi feita na mesma balança digital, com uma precisão de 0,1 g, da marca ADAM e modelo CBW-30.

A quantidade de material usado na formulação das caldas em estudo apresentam-se na Tabela III.1 do Anexo III.



Figura 3.2 – a) Misturador de pá; b) Misturador de hélice.

¹ Este equipamento de mistura encontra-se normalizado para a preparação de argamassas de cimento de acordo com a Norma NP EN 196-1:2006 [23].

3.3.2 Protocolo de amassadura com o misturador de pá

Produziram-se caldas de cimento com um equipamento de mistura (Figura 3.2 (a)), constituído por um recipiente em aço inoxidável com uma capacidade de cerca de 5 L, com forma e dimensões indicadas na Figura 3.3, fixado firmemente à armação do equipamento misturador, e por um misturador de pá também em aço inoxidável com forma e dimensões indicadas na Figura 3.3. A pá misturadora é accionada por um motor eléctrico, com duas velocidades (lenta: 140 ± 5 rot/min; rápida: 285 ± 10 rot/min), num movimento de rotação sobre si mesma, acompanhado de um movimento planetário em torno do eixo do recipiente.

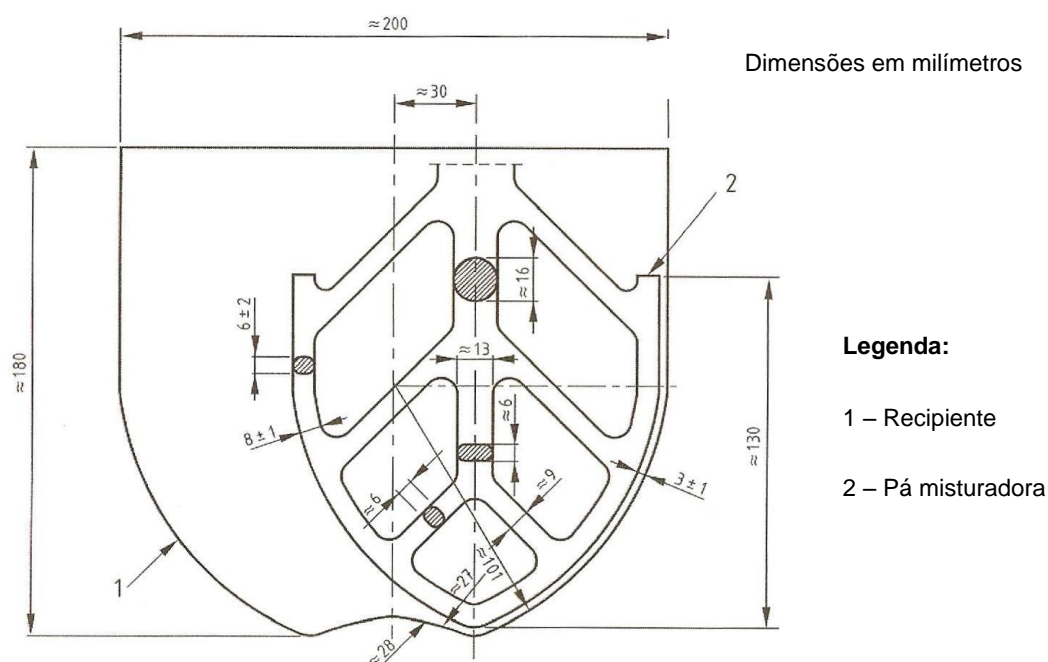


Figura 3.3 – Disposição, forma e dimensões do recipiente e pá misturadora constituintes do equipamento misturador de pá. [adaptado de [23]]

A preparação das caldas com este equipamento foi efectuada seguindo dois protocolos diferentes. Ambos se basearam no procedimento de preparação da argamassa para avaliação dos requisitos mecânicos do cimento que se encontra descrito na norma NP EN 196-1:2006 [23], sem a adição da areia. A diferença entre os dois protocolos é que num se introduz primeiro o cimento e de seguida a água, enquanto que no outro trocou-se a sequência de introdução dos constituintes, ou seja introduz-se primeiro a água e depois o cimento. Os dois protocolos adoptados estão sistematizados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Protocolos utilizados nas amassaduras das caldas com o misturador de pá.

Protocolo A	Protocolo B
1. Pesar o cimento	
2. Pesar a água	
3A. Colocar <u>cimento</u> no recipiente do misturador	3B. Colocar a <u>água</u> no recipiente do misturador
4. Ligar o misturador na velocidade lenta (140 rot/min);	
5A. Nos 30 segundos seguintes colocar, gradualmente, a <u>água</u> no recipiente do misturador	5B. Nos 30 segundos seguintes colocar, gradualmente, o <u>cimento</u> no recipiente do misturador
6. Misturar durante mais <u>60 segundos</u> na velocidade lenta (140 rot/min);	
7. Parar o misturador durante <u>90 segundos</u> . Durante a pausa retirar pasta de cimento acumulada nos bordos e fundo do recipiente com uma colher ou espátula de borracha e re-misturar essa pasta no meio do recipiente;	
8. Misturar durante mais <u>60 segundos</u> na velocidade rápida, 285 rot/min	
9. Parar o misturador, usar a colher para retirar pasta de cimento acumulada nos bordos e fundo e re-misturar essa pasta no meio do recipiente, caso ainda existam grânulos.	

3.3.3 Protocolo de amassadura com o misturador de hélice

A mistura das caldas com misturador de hélice (Figura 3.2 (b)), constituído por uma vareta de agitação com uma hélice na sua extremidade acoplada a um berbequim, foi efectuada num balde com capacidade para cerca de 50 litros, tendo sido criado um sistema que permitisse anular a projecção de calda durante a mistura, originada pela rotação da vareta de agitação do misturador. Este sistema dispõe de dois orifícios, um para a entrada do cimento e o outro para permitir o funcionamento do misturador sem ser afectado/limitado o movimento de rotação do equipamento (Figura 3.4). Apesar do berbequim ter duas velocidades reguláveis, apenas foi utilizada a mais baixa (0 – 1050 rot/min), fazendo variar a sua intensidade através do botão de accionamento do equipamento. A velocidade mais elevada (0 – 2400 rot/min) tem uma intensidade demasiado alta, originando um movimento de rotação da vareta que provoca um desperdício desnecessário de calda.



Figura 3.4 – Esquema de montagem do equipamento utilizado para a produção de caldas com misturador de hélice.

O protocolo adoptado está sistematizado na Tabela 3.3. Neste protocolo utilizou-se como referência para o tempo total de mistura da calda e para a sequência de introdução dos seus constituintes, o disposto no Artigo 169º, ponto 3, do REBAP [2], que se transcreve:

Artigo 169º - REBAP

“169.3 – O fabrico da calda deve ser feito mecanicamente (lançando no misturador primeiro a água e depois o cimento), de modo a obter necessária homogeneidade, e não deve demorar mais de 5 minutos. (...)”

Tabela 3.3 – Protocolo utilizado nas amassaduras das caldas com o misturador de hélice.

Protocolo de amassadura com misturador de hélice
1. Pesar o cimento
2. Pesar a água
3. Colocar a água no balde de amassadura
4. Ligar o berbequim com a hélice acoplada na velocidade 1 (0 – 1050 rot/min)
5. Colocar o cimento nos 2 minutos seguintes sem interrupção da agitação
6. Misturar durante 3 minutos, aumentando a intensidade da velocidade com o gatilho de accionamento do berbequim, para dissolver possíveis grumos e tornar a calda homogénea

3.4 PREPARAÇÃO DAS CALDAS DE CIMENTO *IN SITU* (OBRA)

Na obra descrita na secção 1.8, as caldas foram preparadas no equipamento de mistura mecânica denominado UNIGROUT da marca Atlas Copco (Figura 3.5), por colaboradores da RODIO. Este equipamento dispõe de duas cubas nas quais se dispõe de agitação mecânica através de uma turbina, qua acciona um agitador de pás: numa das cubas produz-se a calda, sendo a mistura efectuada com a rotação de pás a alta velocidade. A calda é depois transferida para a outra cuba e conservada, com uma agitação a uma velocidade mais lenta, até ser utilizada.

A massa de água é quantificada recorrendo a um aparelho contador de litros da marca PIUSI, modelo K33 (Figura 3.6). Este equipamento é instalado na tubagem que abastece a primeira cuba de água. A massa de cimento é quantificada assumindo que cada saco de cimento tem 40 kg.

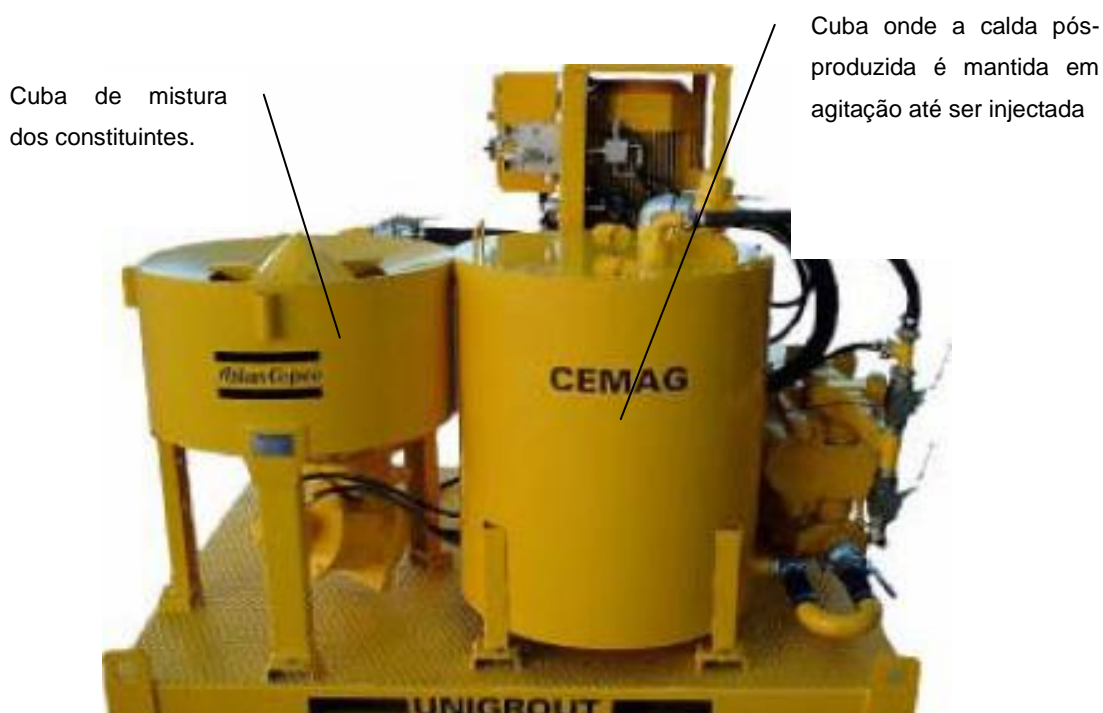


Figura 3.5 – Equipamento UNIGROUT utilizado para a produção de caldas de cimento para trabalhos de injeção em obras de geotecnia (adaptado de [30]).

Na Tabela 3.4 apresenta-se o protocolo utilizado na produção de caldas na obra:

Tabela 3.4 – Protocolo utilizado na produção de caldas de cimento *in situ*.

Protocolo de amassadura com misturador mecânico UNIGROUT
1. Introduzir água até o aparelho contador de litros registrar a quantidade pretendida
2. Iniciar a rotação das pás da cuba de produção das caldas de cimento
3. Juntar o cimento na cuba sem interromper a agitação (Figura 3.7)
4. Misturar durante 3 minutos
5. Parar a agitação, concluindo a rotação das pás
6. Transferir a calda produzida para a outra cuba até ser injectada (a calda deve permanecer em agitação a uma velocidade mais lenta que a utilizada para a sua preparação)



Figura 3.6 – Aparelho contador de litros.



Figura 3.7 – Introdução do cimento na cuba.

3.5 PREPARAÇÃO DAS CALDAS DE CIMENTO *IN SITU* PARA A EXECUÇÃO DE MICROESTACAS (INSTALAÇÕES DA RODIO)

Foram produzidas duas caldas na RODIO em dois equipamentos diferentes, a primeira foi preparada numa betoneira tradicional (Figura 3.8) e a segunda no misturador mecânico também usado na preparação das caldas *in situ* (secção 3.4), na obra que a RODIO tinha em curso, denominado UNIGROUT (Figura 3.5).



Figura 3.8 – Exemplo de uma betoneira tradicional.

A mistura da calda preparada com o misturador UNIGROUT seguiu o protocolo descrito na Tabela 3.4. O protocolo adoptado para produzir a calda com a betoneira tradicional está sistematizado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Protocolo utilizado na produção de caldas *in situ* com betoneira tradicional.

Protocolo de amassadura com betoneira tradicional	
1.	Colocar água na betoneira
2.	Iniciar a rotação da betoneira
3.	Colocar gradualmente todo o cimento na betoneira
4.	Misturar durante 3 minutos
5.	Parar a rotação da betoneira

3.6 ENSAIOS DE CALDAS NO ESTADO FRESCO

Quando se junta cimento e água começa, imediatamente, a ocorrer uma série de reacções químicas que transformam progressivamente a suspensão água-cimento numa matriz sólida. Este processo tem associado perda de plasticidade da mistura até atingir a “presa” que consiste na rigidificação do material tornando-o não deformável, ainda que a sua com resistência à compressão possa ser pouco significativa.

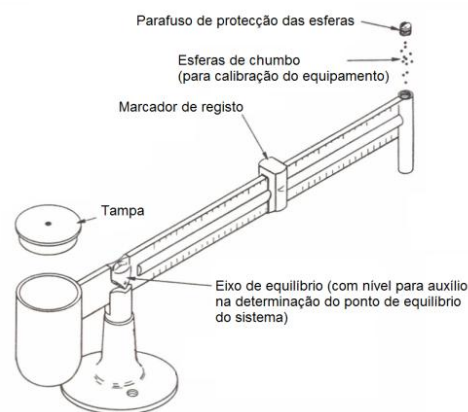
Considera-se que os materiais à base de cimento estão no “estado fresco” quando ainda apresentam comportamento plástico. A caracterização deste estado deve ocorrer logo após a conclusão das respectivas amassaduras e como critério uniformizador de reprodutibilidade das condições da calda adoptou-se, sempre, a mesma sequência na realização dos ensaios.

3.6.1 Massa Volúmica

Na determinação da massa volúmica das caldas preparadas neste trabalho adoptou-se como referência a norma NP EN 445:2008 [1], que prevê que esta propriedade nas caldas de injeção para armaduras de pré-esforço seja estimada pelo quociente entre a massa e o volume da calda no estado fluído. A Norma citada refere numa nota que uma “balança para lama” constitui um equipamento aceitável para a determinação da massa volúmica. O equipamento utilizado neste trabalho para a determinação desta propriedade foi um aparelho de equilíbrio, cuja designação em inglês é *Mud Balance*, da marca Fann, modelo 140 (Figura 3.9).



a)



b)

Figura 3.9 – a) Equipamento utilizado para a avaliação da massa volúmica das caldas; b) Esquema do aparelho utilizado [adaptado 31].

Este aparelho permite a leitura directa da massa volúmica da calda, dispondo de uma escala graduada em g/cm^3 – não sendo necessário qualquer cálculo para a determinação da massa volúmica.

Antes de qualquer ensaio o equipamento deve ser verificado e devidamente calibrado, como refere a Norma NP EN 445:2008 [1].

O protocolo de ensaio para a determinação da massa volúmica das caldas de cimento apresenta-se sistematizado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Protocolo de ensaio para determinação da massa volúmica das caldas.

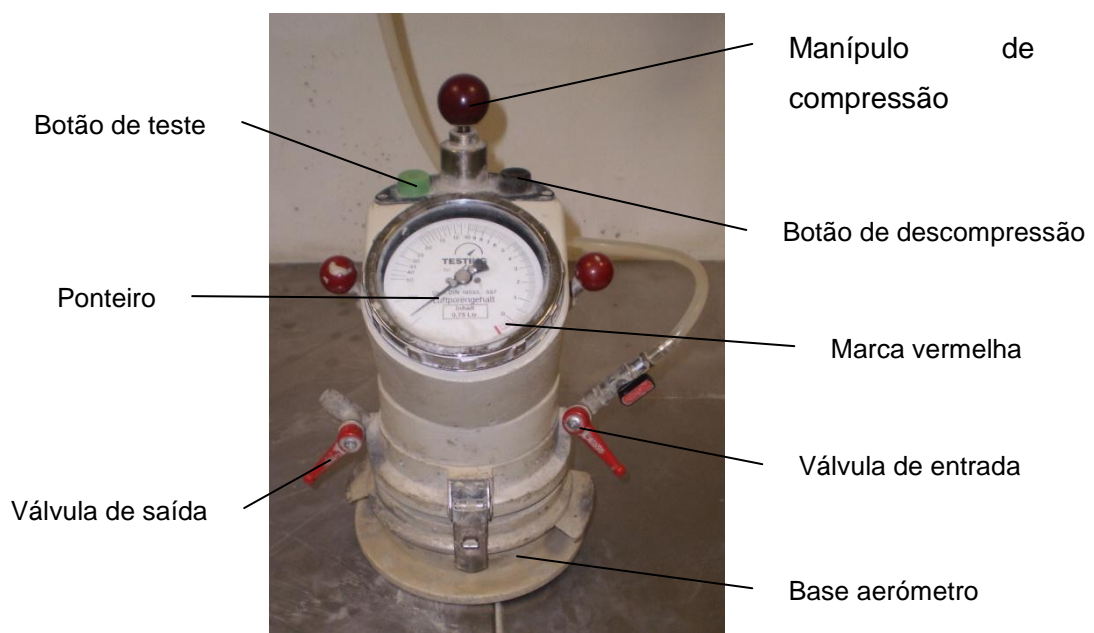
Ensaio de determinação da massa volúmica	
1.	Verificar o equipamento
1.1.	Colocar água no recipiente
1.2.	Colocar a tampa, permitindo a saída do excesso de água através da purga localizada na parte superior da mesma
1.3.	Secar a toda a superfície externa do aparelho com um pano seco
1.4.	Ajustar o marcador de registo até se atingir o ponto de equilíbrio do aparelho
1.5.	Se o valor registado pelo marcador for 1 g/cm^3 , passar para o ponto 3. Caso contrário proceder à calibração do equipamento – ponto 2
2.	Calibrar o equipamento
2.1.	Sem retirar a água já colocada no recipiente no ponto 1, proceder à remoção ou colocação de pequenas esferas de chumbo na extremidade oposta do recipiente, até que o ponto de equilíbrio indicado pelo marcador de registo coincida com o valor de referência para a massa volúmica da água – 1 g/cm^3
3.	Retirar a água do recipiente
4.	Secar o equipamento com um pano seco
5.	Introduzir calda no recipiente
6.	Tapar o recipiente com a tampa, permitindo a remoção do excesso de calda pela purga
7.	Limpar a superfície externa do equipamento com um pano
8.	Proceder à leitura e registo do valor da massa volúmica indicado pelo marcador de registo

3.6.2 Teor em Ar

O teor de ar contido nas caldas foi determinado com um aerómetro da marca ATH, modelo BF1.0337. Na Figura 3.10 apresenta-se um esquema do equipamento de ensaio.



a)



b)

Figura 3.10 – a) Conjunto aerómetro–base; b) Esquema exemplificativo do aerómetro.

Este ensaio foi efectuado tendo como referência o disposto na Norma DIN 18555-2:1982 [24].

O protocolo de ensaio adoptado encontra-se sistematizado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Protocolo de ensaio para determinação do teor em ar das caldas de cimento.

Ensaio de determinação do teor em ar
1. Introduzir a calda na base do aerómetro
2. Retirar o excesso com auxílio de uma régua metálica através de movimentos transversais e com lenta progressão – “movimento de serra”
3. Limpar a extremidade da base para que o aerómetro encoste directamente na parte metálica da base, livre de calda, permitindo assim uma vedação perfeita do conjunto
4. Posicionar o aerómetro sobre a base e garantir que as válvulas estão fechadas (posição para baixo)
5. Saturar a amostra de calda com água, abrindo as duas válvulas (posição para cima) do aerómetro
6. Fechar imediatamente e em simultâneo as duas válvulas no instante em que começar a sair calda em fluxo contínuo pela válvula de saída – momento de saturação da amostra
7. Comprimir a amostra através do manípulo localizado na parte superior do aerómetro até que o ponteiro ultrapasse a marca vermelha
8. Corrigir o ponteiro ao valor “zero” através do botão de descompressão (botão de cor preta)
9. Premir o botão de teste (botão de cor verde) para que seja efectuado o teste
10. Registrar o valor do teor em ar da amostra, indicado pelo ponteiro do aerómetro

3.6.3 Determinação do início e fim de presa

Nos materiais à base de cimento, o instante em que o material rigidifica, i.e. passa do estado líquido para o estado sólido designa-se “presa”, sendo a sua determinação exacta difícil. Tipicamente, distinguem-se dois momentos: início de presa, que consiste no tempo decorrido entre a amassadura e a perda de plasticidade e fim de presa que consiste no tempo necessário para que a pasta adquira a firmeza suficiente para resistir a certa pressão.

Neste trabalho adoptou-se como referência o disposto na Norma NP EN 447:2008 [4] que prevê a determinação do início e do fim de presa de caldas de injeção para armaduras de pré-esforço de acordo com o ensaio descrito na norma NP EN 196-3:2006 [25] para este fim. Neste ensaio considera a utilização de uma agulha (Figura 3.11 (a)) de 1 mm² de secção, sob acção de um peso de 300 g, fazendo leituras de profundidade de penetração da agulha, em intervalos de tempo periódicos. Assume-se como início de presa o momento em que a agulha já não atravessa a calda até ao

fundo, ficando a 4 ± 1 mm da base. A seguir, substitui-se a agulha por outra semelhante com um anel de 5 mm de diâmetro, colocado a 0,5 mm da sua extremidade. Periodicamente, poisa-se esta agulha na superfície da calda e considera-se o fim de presa quando a agulha deixa a sua marca sem que o anel imprima qualquer sinal i.e., quando a agulha penetra menos que 0,5 mm. Na Figura 3.11 (b) apresenta-se uma imagem do equipamento utilizado neste ensaio que se denomina aparelho de Vicat. A amostra de calda para a determinação do início e fim de presa é colocada num molde cilíndrico ou, preferencialmente troncocónico (Figura 3.11 b)).

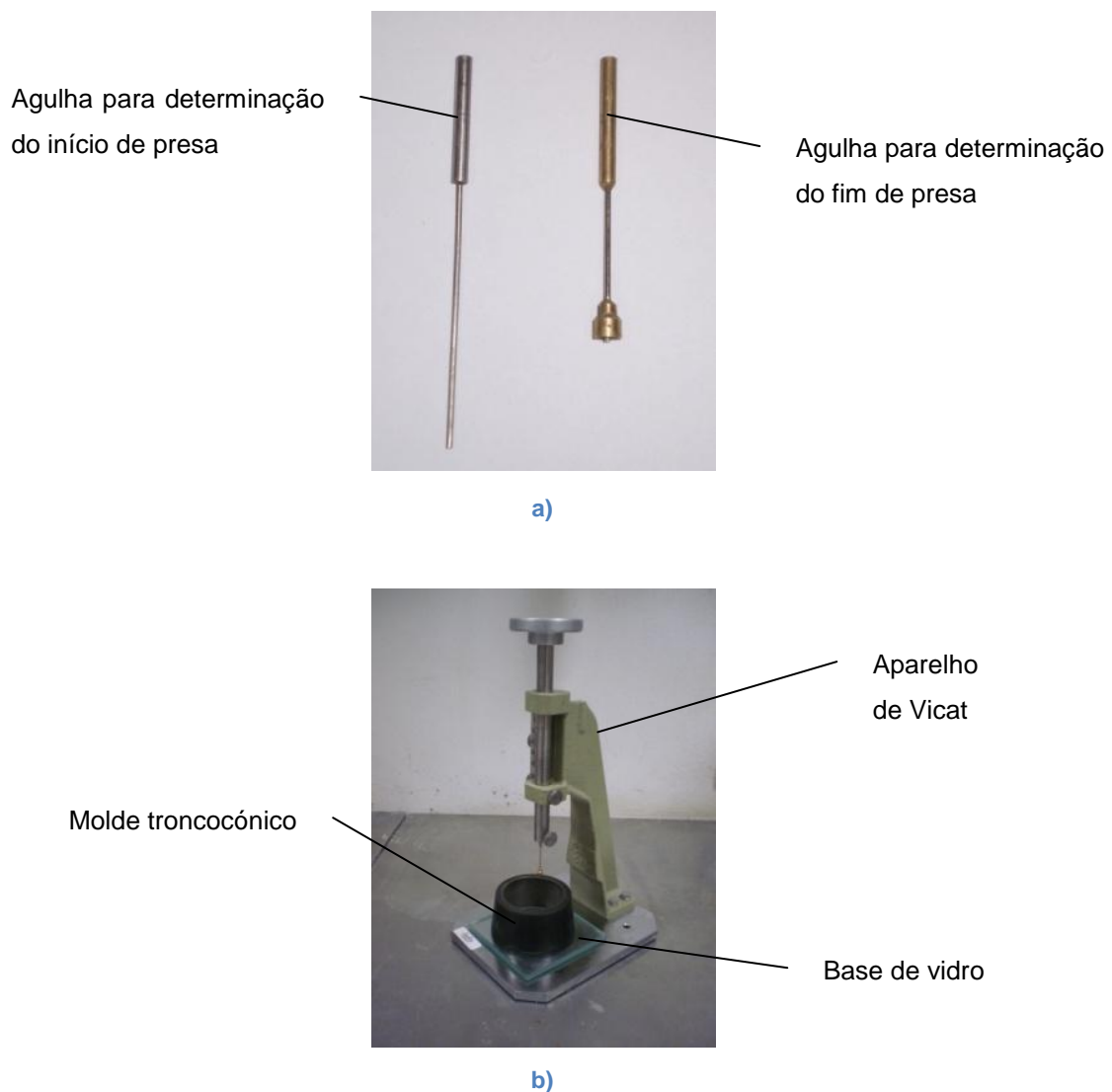


Figura 3.11 – a) Agulhas para determinação do início e fim de presa; b) Aparelho de Vicat.

O protocolo de ensaio adoptado para a avaliação do início e fim de presa das caldas estudadas está sistematizado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Protocolo de ensaio para determinação do início e fim de presa das caldas de cimento.

Ensaio de avaliação do tempo de presa
1. Untar uma base de vidro e um molde troncocónico com óleo (óleo vegetal)
2. Colocar calda no interior do molde
3. Retirar o excesso de calda com auxílio de uma régua metálica, regularizando assim a superfície da amostra
4. Deixar a amostra ganhar alguma consistência
5. Iniciar o registo das penetrações da agulha (Figura 3.11 (a)) através do aparelho de Vicat, com intervalos de tempo de 10 minutos
6. Registar o tempo em que a agulha atinge uma altura $\geq 4 \pm 1$ mm em relação à base – este tempo assume-se como sendo o início de presa
7. Substituir a agulha por outra semelhante com um anel de 5 mm, colocado a 0,5 mm da sua extremidade (Figura 3.11 (b)), destinada ao registo do fim de presa
8. Iniciar o registo do contacto da agulha na amostra através do aparelho de Vicat, igualmente com intervalos de 10 minutos
9. Registar o tempo em que agulha deixa a sua marca sem que o anel imprima qualquer sinal na amostra – este tempo assume-se como sendo o fim de presa

3.6.4 Moldagem, Desmoldagem e Cura de Provetes Paralelepípedicos

Os provetes paralelepípedicos foram preparados em moldes de aço² (Figura 3.12) de três prismas de dimensões 160 x 40 x 40 [mm³], seguindo a recomendação da norma NP EN 445:2008 [1] no que se refere ao método de resistência à compressão de caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Esta norma prevê que a moldagem seja feita de acordo com o protocolo apresentado na norma NP EN 196-1:2006 [23] com as necessárias adaptações por se tratar de uma calda em vez de argamassa.

² Estes moldes encontram-se normalizados para a moldagem de argamassas de cimento de acordo com a norma NP EN 196-1:2006 [23].

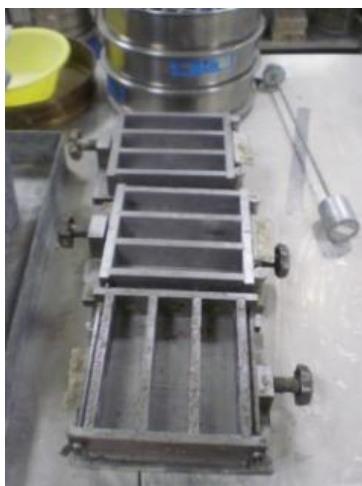


Figura 3.12 – Moldes de aço para moldagem de provetes paralelepípedicos.

A diferença entre a preparação de provetes paralelepípedicos de caldas preparadas no laboratório (Tabelas 3.2 e 3.3) e preparadas *in situ* (Tabelas 3.4 e 3.5) consistiu no acondicionamento dos moldes preenchidos com calda nas primeiras 24 horas de cura: os moldes preenchidos com as caldas preparadas no **laboratório**, foram colocados numa câmara de cura do Laboratório de Materiais de Construção do ISEL, com condições controladas, a uma temperatura de 24 °C e uma humidade relativa de 83%, cobertos com uma placa de vidro e um pano húmido, enquanto que os moldes preenchidos com calda preparada ***in situ*** foram deixados ao ar livre, à sombra e protegidos com uma placa de vidro e um pano húmido.

Ao fim das 24 horas procedeu-se à desmoldagem cuidada dos provetes de acordo com o procedimento descrito na Norma NP EN 196-1:2006 [23]. Os moldes utilizados são desmontáveis, permitindo uma desmoldagem que evita que as amostras fiquem danificadas. Os provetes de caldas preparadas no laboratório foram de seguida identificados e mergulhados em água na câmara de cura onde permaneceram até à data de ensaio e os provetes de caldas preparadas *in situ* foram levados para o laboratório do ISEL e colocados na mesma câmara, também mergulhados em água.

Na Tabela 3.9 está sistematizado o protocolo de moldagem, desmoldagem e cura dos provetes paralelepípedicos de caldas preparadas no laboratório e *in situ*.

Tabela 3.9 – Protocolo de moldagem, desmoldagem e cura de provetes com caldas preparadas no laboratório e *in situ*.

Caldas Preparadas no Laboratório	Caldas Preparadas <i>In Situ</i>
1. Untar as superfícies do molde com óleo (óleo vegetal)	
2. Preencher o molde com calda	
3. Retirar o excesso da calda e regularizar a superfície com auxílio de uma régua metálica, movimentando-a transversalmente com pequena progressão – “movimento serra”	
4A Colocar os moldes na câmara condicionada	4B Colocar os moldes à sombra
5. Cobrir os moldes com uma placa de vidro e um pano húmido	
6. Desmoldar os provetes ao fim de 24 horas	
7A Identificar os provetes	7B Recolher os provetes, levá-los para o laboratório e identificá-los
8. Colocar os provetes na câmara de cura de condições controladas (temperatura 24 °C e humidade relativa de 83%), mergulhados em água até à data de ensaio	

3.6.5 Moldagem, Desmoldagem e Cura de Provetes Cúbicos

A preparação dos provetes cúbicos, tanto no laboratório como *in situ*, obedeceu aos mesmos protocolos adoptados para a moldagem, desmoldagem e cura dos provetes paralelepípedicos (Tabela 3.9), com a excepção do tipo de molde e do processo de desmoldagem.

Os provetes cúbicos foram preparados em moldes que permitem a produção de duas amostras, com dimensões de 100 x 100 x 100 [mm³] (Figura 3.13).

A desmoldagem dos provetes foi assegurada com auxílio de um compressor, cuja pistola é colocada num orifício situado na parte inferior dos moldes, que ao ser accionada permite a saída do cubo do molde. Este orifício foi devidamente tapado antes do preenchimento dos moldes com calda. A desmoldagem foi feita sobre uma superfície macia para que o embate dos provetes não danificasse as suas arestas.



Figura 3.13 – Moldes para preparação de provetes cúbicos.

3.6.6 Execução e Cura de Microestacas em meio não confinado

As microestacas concebidas para este trabalho foram executadas em meio não confinado, ou seja, fora do ambiente de confinamento que o solo imprime nas microestacas, para que fosse possível a visualização da rotura da calda de recobrimento das microestacas quando fosse realizado o ensaio de rotura dessa calda de cimento.

Os moldes das microestacas foram criados com tubos de policloreto de vinilo (PVC), com cerca de um metro de comprimento. No interior destes moldes, antes da introdução da calda de cimento, foram introduzidos os tubos de aço das microestacas, devidamente centrados em relação aos moldes. Os moldes foram colocados no interior de bidões metálicos. Na Figura 3.14 encontram-se esquematizados os elementos utilizados na execução das microestacas concebidas neste trabalho.



Figura 3.14 – Elementos utilizados na execução das microestacas concebidas neste trabalho.

Logo após a produção das caldas de cimento, efectuou-se o preenchimento dos moldes, enchendo-os até cerca de 5 cm do topo superior.

A cura das microestacas foi assegurada enchendo com água os bidões metálicos onde foram colocadas. Teve-se em atenção que os moldes ficariam à sombra durante todo o dia. As amostras de microestacas permaneceram nestas condições até ao dia de ensaio.

A desmoldagem das microestacas foi feita com auxílio de uma rebarbadora que permitiu o corte dos tubos de policloreto de vinilo (PVC), que serviram de moldes. O

uso desta ferramenta foi feito com especial atenção para que as amostras não fossem danificadas.

O protocolo adoptado para a preparação das microestacas está sistematizado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Protocolo utilizado para a preparação das microestacas.

Preparação de Microestacas	
1.	Colocar os tubos de aço das microestacas nos tubos de policloreto de vinilo (PVC), devidamente centrados
2.	Colocar os moldes no interior dos bidões metálicos
3.	Preencher os moldes com calda de cimento (Figura 3.15)
4.	Encher os bidões metálicos com água
5.	Desmoldagem das microestacas na data de ensaio (Figura 3.16)



Figura 3.15 – Introdução de calda de cimento nos moldes.



Figura 3.16 – Micro-estaca desmoldada e outra em fase de desmoldagem.

3.7 CONDIÇÕES AMBIENTAIS DE CURA

3.7.1 Provetes paralelepípedicos e cúbicos

A câmara de cura onde os provetes paralelepípedicos e cúbicos foram colocados após a desmoldagem é uma sala condicionada, com condições controladas, a uma temperatura de 24 °C e uma humidade relativa de 83%. A sala dispõe de um tanque com água onde as amostras são colocadas depois de desmoldadas (Figura 3.17), até à data de ensaio.



Figura 3.17 – Tanque com água na sala condicionada, onde os provetes foram colocados depois de desmoldados.

O registo da temperatura e da humidade foi efectuado com um higrómetro, apresentado na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Higrómetro para controlo da temperatura e humidade relativa.

Este aparelho está equipado com dois termómetros, um mede a temperatura seca, outro mede a temperatura húmida. A humidade relativa é calculada através de uma tabela higrométrica disponível no manual de instruções do equipamento. O uso destas

tabelas consiste no cruzamento do valor da temperatura seca com o valor da diferença entre a temperatura seca e a temperatura húmida. O valor que intersecte esses dois dados corresponde à humidade relativa da sala de cura.

Os valores da temperatura seca e temperatura húmida registados para a câmara condicionada foram 24 °C e 22 °C, respectivamente.

A determinação dos valor da humidade relativa para a sala de cura utilizada encontra-se sistematizado no Anexo II.

3.8 ENSAIOS DE CALDAS NO ESTADO ENDURECIDO

Considera-se que os materiais à base de cimento estão no “estado endurecido” quando já não apresentam comportamento plástico. A caracterização neste estado – determinando a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e as resistências mecânicas à compressão e à flexão – foi efectuada em diferentes fases do desenvolvimento do fenómeno de endurecimento das caldas nomeadamente, aos 2, 7 e 28 dias de idade. Apresentam-se, de seguida, os protocolos de ensaio pela ordem da sua realização em cada provete ensaiado.

3.8.1 Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-sónicas

O equipamento utilizado para a medição da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas ao atravessarem caldas endurecidas é da marca PROCEQ, modelo TICO (Figura 3.17).

A referência normativa para este ensaio foi a Norma ISO/DIS 8047 [26].

Este ensaio consiste no equipamento emitir um impulso eléctrico de frequência ultra-sónica – 50 kHz – que é conduzido a um transdutor emissor (Tx) colocado em contacto com a superfície do provete a analisar. A onda atravessa o provete sendo captada por outro transdutor receptor (Rx), também em contacto com a superfície do provete, onde é transformado novamente num impulso eléctrico e conduzido de volta ao equipamento que mede directamente o tempo gasto no percurso (Figura 3.19). Dado que o equipamento em causa permite introduzir a informação sobre a distância percorrida entre os transdutores, dispõe também de um *software* que calcula a velocidade aparente de propagação da onda naquele percurso (recorrendo à equação 3.1) cujo valor surge no visor.

$$V_{aparente} = \frac{d}{t} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Em que:

$V_{aparente}$ – velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas (km/s);

d – distância percorrida pela onda (entre os transdutores) (mm);

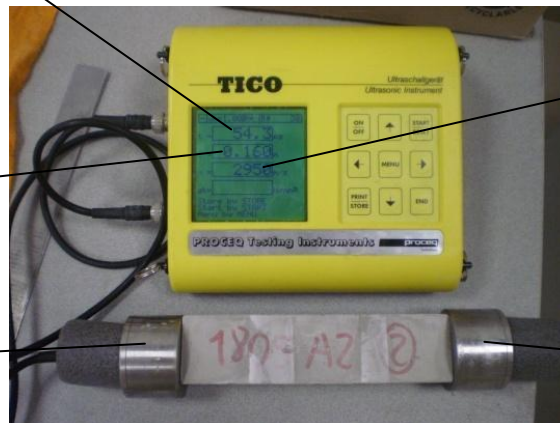
t – tempo gasto pela onda a percorrer a distância entre os transdutores (μs).

No caso dos provetes paralelepípedicos os sensores foram colocados longitudinalmente, porque embora a influência da distância entre os transdutores seja um factor que ainda não esteja suficientemente estudada, é recomendado uma distância mínima de 100 mm, para que a medição da velocidade de propagação da onda não seja influenciada pela natureza heterogénea do material que atravessa. [14]. Como os provetes cúbicos têm as faces com as mesmas dimensões, os sensores foram posicionados em faces opostas que apresentavam as superfícies mais regulares. É essencial que os transdutores fiquem nas melhores condições possíveis de contacto com a superfície dos provetes. Nesse sentido, utilizou-se uma massa de contacto (vaselina) tanto nas superfícies dos transdutores, como nas superfícies dos provetes a ensaiar.

Tempo (μs) gasto pela onda a percorrer a distância entre os transdutores

Distância entre transdutores (m)

Transdutor emissor (Tx)



Velocidade aparente (m/s) de propagação das ondas ultra-sónicas

Transdutor receptor (Rx)

Figura 3.19 – Equipamento para avaliação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.

Na Tabela 3.11 sistematiza-se o protocolo de ensaio utilizado para a determinação da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas.

Tabela 3.11 – Protocolo de ensaio para determinação da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas em provetes paralelepípedicos e cúbicos.

Provetes paralelepípedicos	Provetes cúbicos
1. Calibrar o equipamento utilizando uma barra padrão em que o tempo de propagação da onda ultra-sónica é conhecido	
1.1. Colocar massa de contacto (vaselina) nos topos da barra padrão	
1.2. Aplicar os transdutores (emissor e receptor), previamente untados com vaselina, sobre as duas faces opostas da barra padrão	
1.3. Introduzir no equipamento a distância entre os transdutores	
1.4. Regular a leitura do tempo de propagação da onda entre os topos da barra padrão no aparelho até coincidir com o valor de referência, que no caso do aparelho usado neste trabalho é 27 μ s	
2. Retirar o provete com a calda a ensaiar, mergulhado em água na câmara de cura	
3. Secar o provete com auxílio de um pano seco	
4A Untar com vaselina as superfícies opostas longitudinalmente do provete	4B Untar com vaselina duas superfícies regulares opostas do provete
5A Introduzir no equipamento a distância entre o transdutor emissor e o receptor – 0,160 m	5B Introduzir no equipamento a distância entre o transdutor emissor e o receptor – 0,100 m
6. Posicionar os transdutores nas superfícies do provete o mais alinhados possível	
7. Iniciar o teste carregando no botão “START”	
8. Realizar três leituras para um mesmo provete	
9. Registrar o valor máximo das três leituras efectuadas como velocidade de propagação da calda ensaiada	

3.8.2 Avaliação da Resistência mecânica

3.8.2.1 Provetes Paralelepípedicos

Nos provetes paralelepípedicos foram avaliadas as resistências mecânicas das caldas à flexão e à compressão. Estas propriedades foram determinadas seguindo a recomendação da norma NP EN 445:2008 [1] para caldas de injeção para armaduras de pré-esforço, de acordo com a qual os ensaios devem ser realizados em conformidade com o protocolo descrito na norma NP EN 196-1:2006 [23]. Essencialmente, o método de avaliação dos valores destas resistências mecânicas consiste em primeiro realizar o ensaio de flexão através da aplicação progressiva de uma força crescente a meio vão do provete até à sua rotura por flexão, originando dois “meios” paralelepípedos de dimensões 40 x 40 x 80 [mm³]. Estes “meios” paralelepípedos são posteriormente ensaiados à compressão através da aplicação de uma força e registando o valor máximo suportado.

O equipamento utilizado para a efectuar os ensaios de resistência mecânica foi a prensa da marca Controls, modelo L11D2 (Figura 3.20).



Figura 3.20 – Equipamento para ensaio de flexão e compressão de provetes paralelepípedos.

Nas Tabelas 3.12 e 3.13, estão sistematizados os protocolos de ensaio de resistência à flexão e compressão das caldas nos provetes paralelepípedos, respectivamente.

Tabela 3.12 – Protocolo de ensaio de determinação da resistência à flexão de caldas em provetes paralelepípedos.

Resistência à flexão em provetes paralelepípedos
1. Limpar os apoios cilíndricos onde vai ser colocado o provete para o ensaio
2. Colocar o provete nos apoios cilíndricos devidamente centrado relativamente ao ponto de aplicação da força (a meio vão) (Nota: garantir que a força é aplicada numa face regular do provete)
3. Ligar a prensa
4. Accionar o movimento ascendente do cutelo da máquina até se estabelecer contacto com a face do provete
5. Accionar o manípulo da prensa de forma a verificar-se um aumento gradual de da força no provete, de forma contínua e sem choques
6. Registrar o valor de pico, que corresponde à carga de rotura do provete, indicada pelo ponteiro do mostrador da prensa

A determinação do valor de tensão de rotura à flexão tem por base a equação 3.2.

$$F_f = 1,5 \frac{F.l}{b.d^2} \quad [MPa] \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Em que:

F_f – resistência de rotura à flexão [MPa]

F – força de rotura à flexão (valor de pico registado pela prensa) [N]

l – distância entres os apoios cilindricos de apoio do provete [mm]

b – largura do paralelepípedo [mm]

d – espessura do paralelepípedo [mm]

Substituindo os valores das constantes para o caso do equipamento usado neste trabalho e os provetes ensaiados aplica-se equação 3.3.

$$F_f = 1,5 \frac{F \cdot 100}{40 \times 40^2} \quad [MPa] \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Tabela 3.13 – Protocolo de ensaio de determinação da resistência à compressão de caldas em provetes paralelepipedicos.

Resistência à compressão em provetes paralelepipedicos
1. Limpar as superfícies dos pratos da prensa que se usam no ensaio de compressão
2. Posicionar os “meios” paralelepipedos resultantes do ensaio de flexão sobre a placa do prato inferior da prensa, devidamente centrado, e garantindo que uma face regular do paralelepipedo fica em contacto com o prato
3. Ligar a prensa
4. Descer o prato superior da máquina até estabelecer contacto com a face superior do provete
5. Accionar o manípulo da prensa de forma a verificar-se um aumento gradual da força no provete, de forma contínua e sem choques
6. Registrar o valor de pico, que corresponde à carga de rotura do provete, indicada pelo ponteiro do mostrador da prensa
7. Repetir os pontos 1 a 7 para o outro “meio” prisma resultante do ensaio à flexão

A determinação do valor de tensão de rotura à compressão tem por base a equação 3.4.

$$F_c = \frac{F}{A} \quad [MPa] \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Em que:

F_c – resistência de rotura à compressão [MPa]

F – força de rotura à compressão (valor de pico registado pela prensa) [N]

A – área de aplicação da carga [mm²]

No caso dos provetes utilizados neste trabalho o valor de $A = 40 \times 40$ (mm²).

O cálculo das resistências de rotura à flexão e à compressão relativa a cada provete é obtido com aproximação às centésimas, sendo a média dos valores registados para cada argamassa posteriormente arredondada às centésimas.

3.8.2.2 Provetes Cúbicos

Nos provetes cúbicos foi avaliada a resistência, das caldas, à compressão. O equipamento usado foi uma prensa normalmente utilizada para a avaliação da resistência mecânica de betões. Por essa razão, a sensibilidade que se pré-definiu para a paragem do teste após a rotura foi superior àquela que é usada para betões (sensibilidade = 0,6), já que se espera para as caldas de cimento uma resistência significativamente inferior à dos betões, uma vez que os betões têm na sua constituição agregados que aumentam a sua capacidade resistente. A realização dos ensaios de resistência das caldas em provetes cúbicos foi, inicialmente, efectuada na prensa de avaliação da resistência mecânica de betões do Laboratório de Materiais de Construção do ISEL. Na altura em que estavam a ser ensaiados cubos preparados com caldas de razão A/C 0,7, a prensa do ISEL avariou, motivo pelo qual foram utilizadas outras duas prensas: primeiro a prensa de betões do Laboratório de Materiais de Construção do IST e posteriormente a prensa do núcleo de betões do LNEC. No IST apenas foram testados quatro cubos preparados com calda de razão A/C 0,7, com 2 dias de idade. Os restantes cubos preparados até final da campanha experimental foram ensaiados na prensa do LNEC. No espaço de tempo em que se sucedeu a avaria da prensa do ISEL, nas três prensas foram ensaiados cubos com as mesmas características (calda preparada com razão A/C 0,7, com 2 dias de idade), pelo que se pode analisar a reprodutibilidade dos valores obtidos nos três

equipamentos. Os resultados obtidos nesse estudo estão apresentados na secção 4.1.6.4.

Na Tabela 3.14 encontra-se sistematizado o protocolo que foi utilizado para a avaliação da resistência à compressão das caldas nos provetes cúbicos.

Tabela 3.14 – Protocolo de ensaio de determinação da resistência à compressão de caldas em provetes cúbicos.

Resistência à compressão em provetes cúbicos
1. Medir com uma craveira as dimensões das faces do cubo que vão estar em contacto com os pratos da prensa e registá-las (para serem utilizados na fórmula de cálculo da tensão de rotura). As faces de contacto deverão as laterais em contacto com o molde por terem superfícies mais regulares
2. Accionar a prensa para o início do ensaio
3. Registrar o valor da carga máxima indicada pela prensa

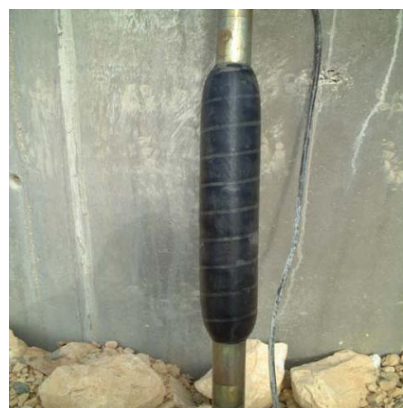
3.8.3 Pressão de rotura das microestacas em meio não confinado

Nas amostras de microestacas produzidas foi efectuada uma simulação de injeção de selagem com água.

A injeção da manchete da micro-estaca foi efectuada com água a partir do mesmo equipamento usado na produção de caldas de cimento *in situ* denominado Unigrout, e com recurso à tecnologia IRS (Injecção Repetitiva Selectiva), já explicada na secção 1.7.1. Nesse sentido foi utilizado um obturador simples (Figura 3.21 a)), que é introduzido no interior do tubo da micro-estaca e cheio com água à pressão (Figura 3.21 b)), constituindo assim uma espécie de tampão impedindo a fuga da água usada para a injeção da manchete. O aumento de pressão no interior do tubo da micro-estaca provocará a rotura da manchete.



a)



b)

Figura 3.21 – a) Obturador fechado [8]; b) Obturador aberto [8]



Figura 3.22 – Esquema de introdução do obturador no interior do tubo de aço da micro-estaca.

O registo do aumento da pressão é monitorizado por um aparelho denominado Logac (Figura 3.23), que memoriza um valor de pressão por cada segundo que passa. O Logac para efectuar o registo é colocado numa posição intermédia entre o equipamento que faz a bombagem da água e o obturador introduzido no tubo da micro-estaca, ligando uma mangueira entre a Unigrout e o Logac, e outra entre o Logac e obturador.



Figura 3.23 – Equipamento de monitorização e registo da pressão injectada na micro-estaca.

O protocolo adoptado para o registo da pressão de rotura das microestacas está sistematizado na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Protocolo de ensaio para a determinação da pressão de rotura das microestacas em meio não confinado.

Pressão de rotura de microestacas em meio não confinado
1. Desmoldagem da micro-estaca com auxílio de uma rebarbadora
2. Colocar o obturador em pressão no interior do tubo de aço da micro-estaca
3. Ligar o equipamento de monitorização de pressão (Logac)
4. Iniciar a injeção da micro-estaca com aumento gradual da pressão
5. Memorizar os valores das pressões monitorizadas pelo Logac
6. Terminar o ensaio quando a calda de recobrimento da microestaca sofrer rotura

4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento da campanha experimental descrita no capítulo anterior. A apresentação, análise e discussão dos resultados será feita para cada fase da campanha experimental recorrendo, sempre que possível, a tabelas e gráficos. Importa referir que para uma melhor análise, sempre que possível, serão correlacionados valores de diferentes propriedades e serão comparados também valores obtidos em caldas produzidas nas várias fases da campanha experimental e em trabalhos já desenvolvidos anteriormente.

4.1 CALDAS DE CIMENTO PREPARADAS NO LABORATÓRIO

No laboratório preparam-se caldas, com o mesmo cimento, variando sistematicamente a razão A/C (A/C) entre 0,4 e 1,0, com um incremento de 0,1. Estas caldas permitiram:

- (i) avaliar a sensibilidade de propriedades das caldas, no estado fresco e endurecido, relativamente a variações no protocolo experimental. Este estudo foi realizado nas caldas com razão A/C de 0,5 (secção 4.1.1.);
- (ii) correlacionar a razão A/C, utilizada na preparação da calda, com propriedades no estado fresco e endurecido. No estado fresco foram avaliadas as seguintes propriedades: massa volúmica (secção 4.1.2), teor em ar (secção 4.1.3) e tempo de presa (secção 4.1.4) e, no estado endurecido determinou-se a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (secção 4.1.5) e a resistência mecânica (secção 4.1.6) em provetes paralelepípedicos e cúbicos. Para cada razão A/C das caldas repetiram-se 6 amassaduras, com a excepção das caldas com razão A/C de 0,5 para a qual foram produzidas 23 amassaduras.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais efectuados nas caldas em Laboratório encontram-se na Tabela I do Anexo IV. Na Tabela II do mesmo anexo encontra-se a média dos valores obtidos em cada ensaio e o respectivo desvio padrão.

4.1.1 Sensibilidade das propriedades das caldas em relação a variações do protocolo de amassadura

Nas 23 amassaduras das caldas preparadas com razão A/C de 0,5 o protocolo experimental usado não foi sempre o mesmo, tendo-se variado o equipamento de mistura mecânica – misturador de pá e misturador de hélice – e a sequência de introdução dos constituintes – primeiro o cimento e de seguida a água, ou vice-versa. Os protocolos usados na preparação de caldas com misturador de pá e misturador de hélice encontram-se sistematizados nas Tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente.

Na Tabela 4.1, apresenta-se o valor médio dos resultados obtidos nos ensaios das caldas com razão A/C de 0,5, independentemente do protocolo utilizado para na sua preparação.

Tabela 4.1 – Valor médio dos resultados obtidos nos ensaios das caldas com razão A/C de 0,5, independentemente do protocolo utilizado na sua preparação.

Calda	Ensaio				Média ± DP
LAB0.5	Massa Volúmica [g/cm ³]				1,79 ± 0,02
	Teor em Ar [%]				1,39 ± 0,14
	Resistência Mecânica [MPa]	Cubos	Comp.	2 Dias	15,7 ± 0,9
				7 Dias	21,7 ± 0,6
				28 Dias	32,0 ± 0,9
		Paralelepípedos	Flexão	2 Dias	3,6 ± 0,4
				7 Dias	6,1 ± 0,5
				28 Dias	8,6 ± 0,4
	Paralelepípedos	Comp.	2 Dias	16,1 ± 0,5	
			7 Dias	25,0 ± 0,6	
			28 Dias	33,5 ± 1,9	
	Velocidade propagação ondas ultra-sónicas [m/s]	Cubos		2 Dias	2721 ± 26
7 Dias				2942 ± 18	
28 Dias				3056 ± 11	
Paralelepípedos		2 Dias	2713 ± 15		
		7 Dias	2999 ± 24		
		28 Dias	3149 ± 17		

DP - Desvio Padrão

Comp. - Compressão

Detalhes sobre os resultados experimentais obtidos com cada uma das caldas das amassaduras efectuadas evidenciando o protocolo utilizado na preparação de cada uma delas - nomeadamente o tipo de misturador e a sequência de introdução dos constituinte - encontram-se na Tabela I do Anexo IV.

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.1 e na Tabela I do Anexo IV para as caldas com razão A/C de 0,5, verifica-se que apesar do protocolo de amassadura

variar, os resultados obtidos para cada ensaio encontram-se no intervalo correspondente à média \pm desvio padrão. Desta forma pode-se considerar que variando a utilização destes equipamentos e as sequências com que se introduzem os constituintes para a amassadura, os resultados dos ensaios realizados às caldas, tanto no estado fresco como no estado endurecido, não são influenciados. Fundamentado nesta análise considerou-se a média de todos os valores dos resultados obtidos nos ensaios das caldas com razão A/C de 0,5 para a avaliação das suas propriedades, independentemente do protocolo utilizado (Tabela II do Anexo IV). Adoptou-se, ainda, o procedimento de amassadura com misturador de hélice para a preparação das restantes caldas com razões A/C de 0,4 e de 0,6 a 1,0. A vantagem deste procedimento em relação ao utilizado com o misturador de pá é permitir obter, apenas com uma amassadura, a quantidade de calda suficiente para a moldagem dos provetes e para a realização dos ensaios experimentais estabelecidos para a campanha experimental deste trabalho.

Num estudo realizado por Bras [20], foi estudada a influência do procedimento de mistura nas propriedades das caldas de cimento no seu estado fresco. Neste estudo foram preparadas caldas com a mesma composição e com o mesmo tipo de misturador mecânico (misturador de hélice), utilizando cinco procedimentos de amassadura diferentes, em que variaram os tempos de mistura e a sequência de introdução dos constituintes para a preparação da calda. Os resultados obtidos revelam que os procedimentos de mistura utilizados influenciam as propriedades das caldas estudadas, ao contrário do que se verificou no presente estudo, em que a variação do protocolo utilizado na preparação das caldas estudadas não influenciou os resultados dos ensaios às caldas de cimento estudadas.

4.1.2 Massa volúmica

A massa volúmica das caldas no estado fresco foi determinada de acordo com o protocolo sistematizado na Tabela 3.6, apresentada na secção 3.6.1. Com a excepção de algumas amassaduras com razão A/C igual a 0,5, a massa volúmica foi determinada em todas as caldas preparadas. Os resultados da massa volúmica obtidos para todas as caldas ensaiadas encontram-se apresentados na Tabela I do Anexo IV. Os valores médios da massa volúmica obtidos para cada formulação estudada em função da razão A/C expõem-se na Figura 4.1.

Na secção 4.1.3.1 são correlacionados e analisados os valores da massa volúmica com os resultados obtidos na determinação do teor em ar das caldas estudadas, e na

secção 4.1.9 é analisada a relação entre os valores da massa volúmica com os da resistência mecânica das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos.

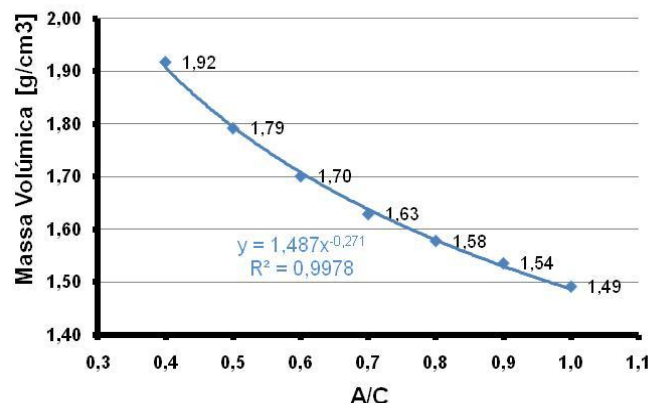


Figura 4.1 – Valores médios da massa volúmica por razão A/C estudada.

Analisando a Figura 4.1, verifica-se que com o aumento da razão A/C das caldas estudadas, o valor das respectivas massas volúmicas vai diminuindo, como era esperado, uma vez que o aumento da razão A/C também está associado ao aumento da rede porosa total [27]. O volume da rede porosa é proporcional à quantidade de água adicionada em excesso relativamente à necessidade de água para que o processo de hidratação do cimento seja completo (dependendo do cimento em causa, a razão A/C correspondente à hidratação completa do cimento, situa-se tipicamente entre 0,3 e 0,6) e é conhecida a relação fundamental da proporcionalidade inversa entre a porosidade e a resistência de sólidos [28].

Na Figura 4.1 é ainda apresentada uma função ajustada à evolução dos valores da massa volúmica por razão A/C das caldas estudadas. Optou-se por ajustar uma função potencial, que apresenta um bom coeficiente de correlação ($R^2 = 0,9978$).

A norma NP EN 447:2008 [4] adoptada como referência para as caldas estudadas neste trabalho, não estabelece nenhum valor específico para esta propriedade, apenas refere que a massa volúmica deve ser medida de acordo com o método de ensaio da norma NP EN 196-3:2006 [25].

Na Tabela 4.2 comparam-se os resultados da massa volúmica obtidos nas caldas estudadas no presente trabalho (que se encontram na Figura 4.1) com os resultados publicados por Rosquiel [3] na avaliação da massa volúmica de caldas de cimento constituídas por água e um tipo de cimento diferente (Portland CEM I PM ES CP2). Pode-se verificar que para as mesmas razões A/C os valores da massa volúmica obtidos têm o mesmo andamento. Esta análise é sustentada pela representação dos

valores incluídos na Tabela 4.2 na Figura 4.2, aos quais foram ajustadas funções potenciais em que se obtiveram bons factores de correlação, e os parâmetros das equações matemáticas das funções ajustadas (também representadas na Figura 4.2) são muito próximos.

Tabela 4.2 – Comparação dos valores da massa volúmica por razão A/C obtidos nas caldas estudadas no presente trabalho e por Rosquiel [3].

Razão A/C	Massa Volúmica [g/cm ³]	
	Presente Trabalho	Rosquiel [6]
0,35	1,98*	1,91
0,40	1,92	1,87
0,45	1,85*	1,80
0,50	1,79	1,77
0,60	1,70	1,65
0,70	1,63	1,59
0,80	1,58	-
0,90	1,54	-
1,00	1,49	1,45

* valores estimados através da função ajustada aos valores apresentados na Figura 4.1: $y = 1,487x^{-0,271}$

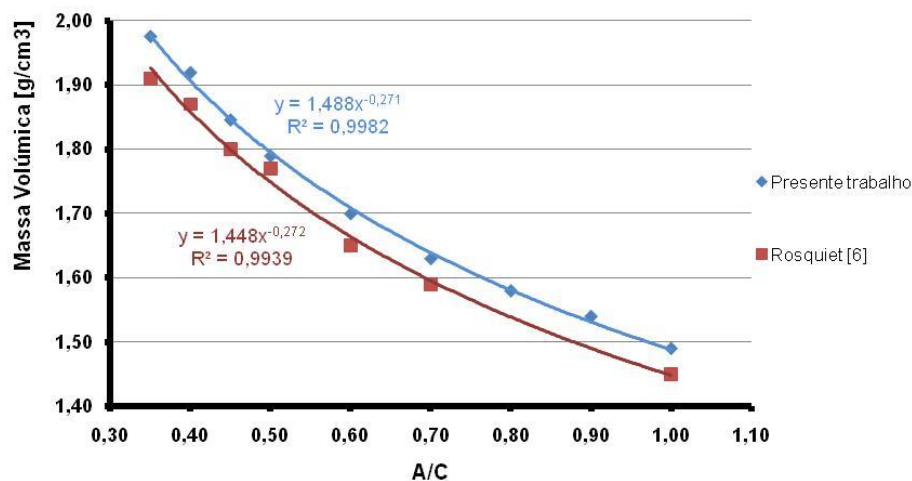


Figura 4.2 – Representação dos valores da massa volúmica em função da razão A/C obtidos nas caldas estudadas no presente trabalho e por Rosquiel [3].

4.1.3 Teor em ar

O teor em ar das caldas no estado fresco foi determinado de acordo com o procedimento descrito na secção 3.6.2. Com a excepção de algumas caldas com razão A/C de 0,5, o teor em ar foi avaliado em todas as caldas preparadas. Os resultados do teor em ar obtidos nas caldas preparadas encontram-se na Tabela I do Anexo IV. Na Figura 4.3 estão representados os valores médios do teor em ar das caldas preparadas para cada razão A/C estudada.

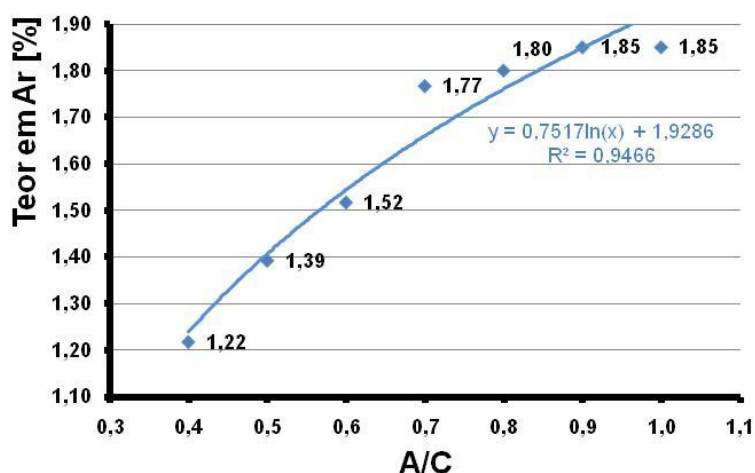


Figura 4.3 – Valores médios do teor em ar por razão A/C estudada.

No gráfico da Figura 4.3 é possível verificar-se que o teor em ar aumenta com o aumento da razão A/C da calda, apresentando um comportamento assintótico a partir de caldas preparadas com razão A/C igual a 0,8. Com o aumento da razão A/C, a densificação da matriz cimentícia diminui, aumentando a porosidade das caldas. O aumento da quantidade de poros da calda permite que uma maior quantidade de ar fique aprisionado no interior da calda, originando um aumento do seu valor de teor em ar.

Em relação à evolução do aumento do teor em ar a razão A/C, na Figura 4.3 pode verificar-se que não é constante. Nas caldas com razões A/C compreendidas entre 0,4 e 0,7, o valor do teor em ar aumenta significativamente, nomeadamente da razão de 0,6 para 0,7, onde se verifica um aumento bastante acentuado. A partir da razão de A/C 0,7 continua a registar-se um acréscimo do valor do teor em ar nas caldas com razão A/C até 0,9, mas neste caso não tão significativo, verificando-se de seguida uma estabilização do valor do teor em ar nas caldas com razão A/C = 1,0. Aos valores apresentados na Figura 4.3 foi ajustada uma função logarítmica (cuja equação se

encontra escrita também na Figura 4.3), por ser a função que apresentava melhor factor de correlação de todas as que foram avaliadas para ajustar aos valores da relação entre o teor em ar e a razão A/C das caldas estudadas. O factor de correlação obtido ($R^2 = 0,9466$) não apresenta um valor tão bom como o obtido ($R^2 = 0,9978$ – Figura 4.1) no ajuste de uma função da mesma natureza aos valores da relação entre a massa volúmica e a razão A/C das mesmas caldas (secção 4.1.2), apresentados na Figura 4.1. Este facto poderá significar que o teor em ar não é correlacionável com a razão A/C.

4.1.3.1 Correlação entre teor em ar e massa volúmica

Uma vez que na secção 4.1.2 se verificou que com o aumento da razão A/C das caldas estudadas a respectiva massa volúmica diminui e, que na secção 4.1.3 se constatou que o aumento da razão A/C conduz ao aumento do teor em ar, então espera-se que a massa volúmica das caldas se reflecta na diminuição do teor em ar.

Na Figura 4.4 estão representados os valores médios da massa volúmica em função dos valores do teor em ar das caldas estudadas. Da análise desta figura, comprova-se que, como atrás foi escrito, o teor em ar diminui à medida que aumenta a massa volúmica da calda. Aos valores apresentados na Figura 4.4 foi ajustada uma função logarítmica (cuja equação se encontra escrita também na Figura 4.4), por ser a função que apresentava melhor factor de correlação das que foram avaliadas para ajustar aos valores da relação entre o teor em ar e da massa volúmica das caldas estudadas. Analisando o factor de correlação obtido ($R^2 = 0,9367$) pode significar que o teor em ar não seja correlacionável com a massa volúmica. Desta forma, verificando-se que o teor em ar não se correlaciona muito bem com a razão A/C (secção 4.1.3) e com a massa volúmica, poderá extrapolar-se esta análise para a relação entre o teor em ar e a resistência mecânica, prevendo-se que também não sejam correlacionáveis.

A diminuição do valor do teor em ar à medida que a massa volúmica aumenta é uma análise que também foi verificada em argamassas de cimento e areias modificadas com polímeros poli (álcool vinílico) num estudo efectuado por Mansur [13]. Neste estudo várias argamassas foram preparadas, em que se manteve a razão A/C e a razão cimento/areia, variando sistematicamente o teor de polímero na argamassa. O aumento do teor de polímero promoveu uma diminuição da massa volúmica, originando um aumento do teor em ar.

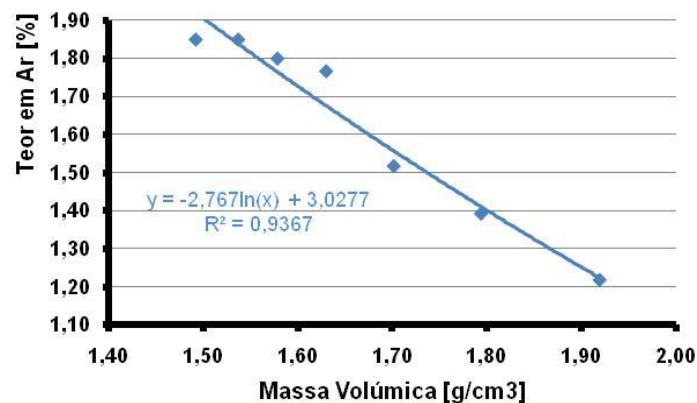


Figura 4.4 – Relação entre os valores do teor em ar e da massa volúmica das caldas estudadas.

4.1.4 Tempo de presa

O tempo de presa foi determinado no estado fresco das caldas, de acordo com o protocolo sistematizado na Tabela 3.8, apresentada na secção 3.6.3. O início e fim de presa foi avaliado em quatro caldas com razão A/C 0,5 (duas caldas preparadas com misturador de hélice e duas com misturador de pá), e para as restantes razões A/C de 0,4 e de 0,6 a 1,0 com incremento de 0,1, o início e fim de presa foi avaliado em duas das caldas preparadas. Os resultados do início e fim de presa obtidos nas caldas avaliadas encontram-se na Tabela I do Anexo IV.

Na Tabela 4.3 encontram-se representados os valores médios do tempo de presa obtidos para cada razão A/C estudada, apresentando-se a evolução desses valores médios por razão A/C na Figura 4.5.

Tabela 4.3 – Valores médios do tempo de presa obtidos para cada formulação estudada.

Calda	Tempo de Presa [h:m]			
	Início	DP	Fim	DP
LAB0.4	3:07	0:48	3:59	0:58
LAB0.5	4:00	0:13	5:15	0:12
LAB0.6	4:23	0:31	5:38	0:24
LAB0.7	4:53	0:07	6:13	0:07
LAB0.8	4:54	0:12	7:06	0:09
LAB0.9	5:14	0:21	7:26	0:10
LAB1.0	5:37	0:06	7:34	0:02

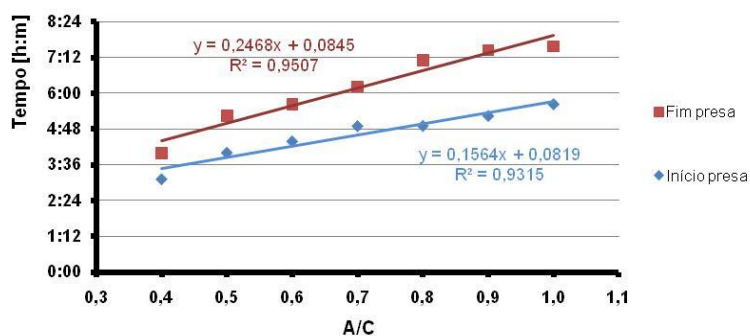


Figura 4.5 – Evolução dos valores do início e fim de presa obtidos por razão A/C estudada.

A norma NP EN 447:2008 [4] – que se refere a caldas de injeção para armaduras de pré-esforço, mas que foi usada como referência neste trabalho – pressupõe a preparação de caldas com razão A/C não superior a 0,44, e estabelece que o início de presa deve ocorrer num limite temporal igual ou superior a três horas e o fim de presa num limite temporal igual ou inferior a 24 horas. Nas caldas estudadas neste trabalho, que foram preparadas com razão A/C entre 0,4 e 1,0 com incremento de 0,1 verifica-se que os valores de início e o fim de presa se encontram dentro dos limites temporais admissíveis indicados por aquela norma.

Aos valores apresentados na Figura 4.5 foram ajustadas funções lineares, por serem as que apresentavam melhores factores de correlação das foram avaliadas.

4.1.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

A velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas foi avaliada no estado endurecido das caldas, curadas quer em provetes paralelepípedicos quer em provetes cúbicos, de acordo com o protocolo de ensaio sistematizado na Tabela 3.11, apresentada na secção 3.8.1.

Com a excepção das caldas preparadas com o misturador de pá³, por cada idade de cura das caldas estudadas (2, 7 e 28 dias) foram moldados três provetes paralelepípedicos e dois cúbicos. Por motivos de avaria do equipamento de avaliação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (Figura 3.19), apenas para as caldas com razão A/C de 0,5 foram registados os resultados em todas as idades de cura das caldas (2, 7 e 28 dias). Nas restantes formulações das caldas estudadas a avaliação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas foi registada apenas aos 2 e 7 dias de cura.

³ O misturador de pá não permite preparar um volume de calda que possibilite a moldagem de três provetes prismáticos e dois cúbicos por cada idade de cura das caldas (2, 7 e 28 dias).

Como já referido, por cada idade de cura das caldas foram moldados três provetes paralelepípedicos e dois cúbicos onde foram determinadas as velocidades de propagação de ondas ultra-sónicas. Desta forma, foram efectuadas três leituras de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em provetes paralelepípedicos e duas em cúbicos por cada idade de cura das caldas estudadas, adoptando-se o valor máximo dessas três leituras como o resultado da velocidade de ondas ultra-sónicas na respectiva idade de cura e tipo de provete. Os resultados obtidos da velocidade de ondas ultra-sónicas nas caldas estudadas encontram-se apresentados na Tabela I do Anexo IV.

Na Tabela 4.4 encontram-se representados os valores médios da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos para cada razão A/C estudada, e os respectivos desvios padrão. Estes valores médios obtidos na determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas de caldas com 2 e 7 dias de idade, curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, encontram-se representados em função da razão A/C na Figura 4.6.

Tabela 4.4 – Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos por razão A/C estudada.

Calda	Velocidade propagação ondas ultra-sónicas [m/s]											
	Cubos						Paralelepípedos					
	2 dias	DP	7 dias	DP	28 dias	DP	2 dias	DP	7 dias	DP	28 dias	DP
LAB0.4	3022	37	3222	19	-	-	3050	40	3355	14	-	-
LAB0.5	2721	26	2942	18	3056	11	2713	15	2999	24	3149	17
LAB0.6	2468	23	2683	31	-	-	2503	8	2778	19	-	-
LAB0.7	2353	31	2528	39	-	-	2385	48	2640	68	-	-
LAB0.8	2275	46	2450	23	-	-	2337	39	2552	88	-	-
LAB0.9	2205	56	2387	25	-	-	2218	29	2473	18	-	-
LAB1.0	2160	27	2358	26	-	-	2182	45	2408	48	-	-

Analisando os resultados do ensaio para os 2 e 7 dias verifica-se que, com o aumento da razão A/C, os valores da velocidade de propagação das ondas vai diminuindo tanto para os provetes paralelepípedicos, como para os cúbicos. Este resultado era o previsto, uma vez que o aumento da razão A/C conduz a um material com menor massa volúmica (Figura 4.1) e mais poroso, pelo que a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas que o atravessam diminui [14]. O aumento da razão A/C das caldas origina uma matriz cimentícia com menor massa volúmica, i.e mais porosa. A presença de poros constitui descontinuidades na propagação de ondas ultra-sónicas no interior das caldas de cimento, diminuindo a sua velocidade [11].

Da análise da Figura 4.6, onde se apresenta a evolução dos valores médios obtidos na avaliação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas de caldas com 2 e 7

dias de idade, curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, em função da razão A/C estudada (que se encontram na Tabela 4.4), verifica-se que independentemente da forma geométrica dos provetes, paralelepípedicos ou cúbicos, a velocidade de propagação das ondas nos provetes com 2 dias é inferior à velocidade aos 7 dias. A mesma análise foi verificada por [11], em que os valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos em argamassas preparadas com a mesma razão A/C ($A/C = 0,6$), duas razões cimento/areia diferentes e curadas em provetes paralelepípedicos, aumentam até aos 7 dias de cura das referidas argamassas. O processo de endurecimento e de hidratação do cimento pode explicar este facto, uma vez que a matriz que as partículas de cimento formam tornam-se mais densas ao longo do tempo de cura, originando um sólido cada vez mais compacto ao longo do tempo, fazendo com que a velocidade de propagação das ondas que o atravessam aumente em relação ao material com um tempo de cura inferior.

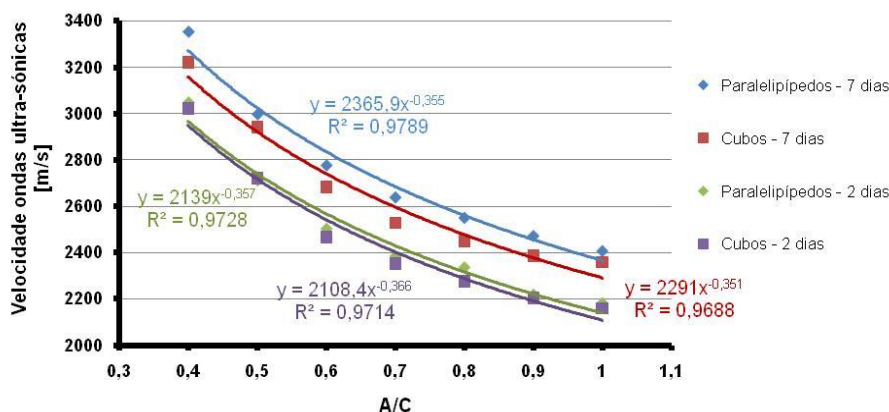


Figura 4.6 – Evolução dos valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos por razão A/C estudada.

Analisando os resultados relativamente à geometria dos provetes onde as caldas foram curadas, constata-se que, para 2 e 7 dias de cura, o valor da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas nas caldas curadas em provetes paralelepípedicos é sistematicamente superior ao valor obtido nas caldas curadas em provetes cúbicos, em relação a todas as razões A/C estudadas. Aos valores apresentados na Figura 4.6 foram ajustadas funções potenciais (cujas expressões matemáticas se encontram escritas também na Figura 4.6), por ser com estas funções que se obtiveram os melhores factores de correlação, de todas as funções que foram avaliadas.

Na Figura 4.7 está representada a evolução dos valores médios da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos nas caldas com razão A/C de 0,5 com 2, 7 e 28 dias de idade (que se encontram na Tabela 4.4).

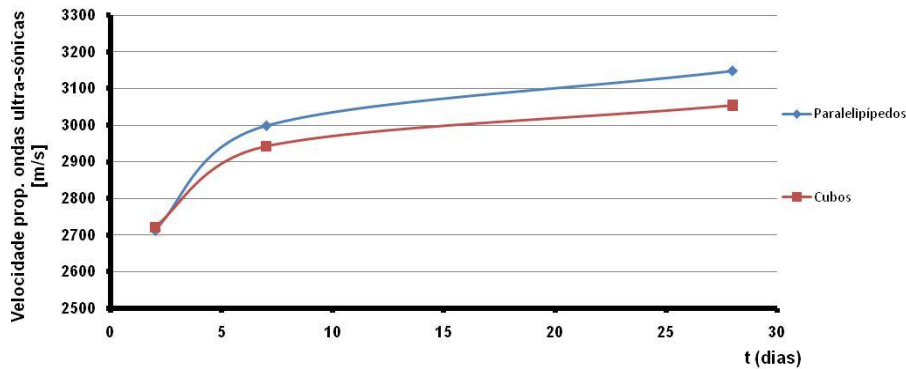


Figura 4.7 – Evolução dos valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos nas caldas com razão A/C de 0,5 ao longo do período de cura.

Da análise da Figura 4.7 verifica-se que a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas aumenta ao longo de todo o período de cura das caldas com razão A/C de 0,5, curadas quer em provetes paralelepípedicos quer em provetes cúbicos. A mesma evolução obteve Karacoc [29] na avaliação da velocidade da propagação de ondas ultra-sónicas em betões com adições minerais, curados em provetes cilíndricos.

Além do processo de cura de hidratação do cimento e do endurecimento das caldas de cimento, à medida que o tempo de cura da calda progride poderão registar-se também fenómenos de retracção, podendo originar fissuras na estrutura interna da calda. Nesse caso, a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas diminuiria ao longo do tempo de cura da calda, como já referido nesta secção, pela presença de descontinuidades no interior das caldas. Como a evolução dos valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas registada na Figura 4.7 é sistematicamente crescente ao longo do período das caldas, curadas quer em provetes paralelepípedicos quer em cúbicos, isto poderá indicar que as caldas estudadas com razão A/C de 0,5 não sofrem fenómenos de retracção nem se formam fissuras no seu interior, ao longo do tempo de cura das mesmas.

4.1.6 Resistência mecânica

Os ensaios de resistência mecânica realizaram-se aos 2, 7 e 28 dias de idade para todas as caldas com as diferentes formulações em estudo neste trabalho (Tabela 3.1) e curadas quer em provetes paralelepípedicos quer em cúbicos. Tal como está descrito na secção 3.8.2.1, as caldas curadas nos provetes paralelepípedicos são inicialmente ensaiadas quanto à sua resistência mecânica à flexão e posteriormente, é avaliada a sua resistência mecânica à compressão. As caldas curadas nos provetes

cúbicos são apenas avaliadas quanto à sua resistência mecânica à compressão (secção 3.8.2.2).

Nas caldas produzidas – nas quais se variou a razão A/C entre 0,4 e 1,0 com um incremento de 0,1 (Tabela 3.1) – e, para cada idade a que se realizaram os ensaios no estado endurecido, foram moldados três provetes paralelepípedicos e dois provetes cúbicos. Cada provete paralelepípedico foi ensaiado à flexão determinando-se um valor de carga máxima da calda à flexão. Na sequência deste ensaio obtêm-se dois meios paralelepípedos que, posteriormente, são utilizados no ensaio de resistência à compressão a partir dos quais se determina dois valores de carga máxima à compressão – por cada provete cúbico determina-se um valor de carga máxima à compressão. Cada valor de carga máxima à flexão e compressão obtido é utilizado nas equações 3.3 e 3.4, respectivamente, determinando-se a tensão de rotura à flexão e compressão das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos. A resistência à flexão e compressão para cada idade de cura das caldas, em provetes paralelepípedicos e cúbicos, é dado pela média dos valores obtidos recorrendo às respectivas equações.

Os valores da resistência à flexão (das caldas curadas em provetes paralelepípedicos) e à compressão (das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos) aos 2, 7 e 28 dias de idade de todas as caldas estudadas, encontram-se apresentados na Tabela I do Anexo IV, sendo que na Tabela 4.5 encontram-se representados os valores médios da resistência à flexão e compressão (obtidos para cada razão A/C estudada), e os respectivos desvios padrão.

Tabela 4.5 – Valores médios da resistência mecânica obtidos por razão A/C estudada.

Calda	Resistência Mecânica [MPa]																	
	Cubos						Paralelepípedos											
	2 dias		7 dias		28 dias		2 dias				7 dias				28 dias			
	Flexão	DP	Flexão	DP	Flexão	DP	Flexão	DP	Comp.	DP	Flexão	DP	Comp.	DP	Flexão	DP	Comp.	DP
LAB0.4	26,0	1,3	33,8	1,6	48,8	1,3	6,2	0,3	29,4	1,7	8,4	1,2	41,3	1,8	9,9	1,2	52,7	1,9
LAB0.5	15,7	0,9	21,7	0,6	32,0	0,9	3,6	0,3	16,1	0,5	6,1	0,5	25,0	0,6	8,6	0,4	33,5	1,9
LAB0.6	10,0	0,4	15,7	0,8	21,6	0,5	2,5	0,6	10,7	0,8	4,4	0,6	17,0	1,1	6,3	0,6	23,4	1,7
LAB0.7	6,8	0,2	11,7	0,2	17,0	0,4	2,0	0,2	8,3	0,8	3,8	0,3	13,0	1,0	5,9	0,3	19,6	1,6
LAB0.8	4,5	0,6	9,4	0,3	14,0	0,6	1,9	0,4	6,7	0,9	3,2	0,3	11,4	2,4	5,5	0,4	16,9	1,2
LAB0.9	4,3	0,1	8,1	0,5	12,5	0,8	1,2	0,6	4,9	1,0	2,4	0,4	8,6	0,9	3,8	0,7	12,1	1,8
LAB1.0	4,0	0,2	7,2	1,0	11,8	0,6	1,1	0,7	4,1	0,8	2,0	0,3	7,9	0,7	3,8	0,8	11,9	2,2

4.1.6.1 Resistência à flexão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos

Na Figura 4.8 está representada a evolução dos valores médios da resistência à flexão obtida nas caldas com 2, 7 e 28 dias de idade e curadas em provetes

paralelepípedicos (que se encontram na Tabela 4.5), em função da razão A/C, usada na preparação da calda.

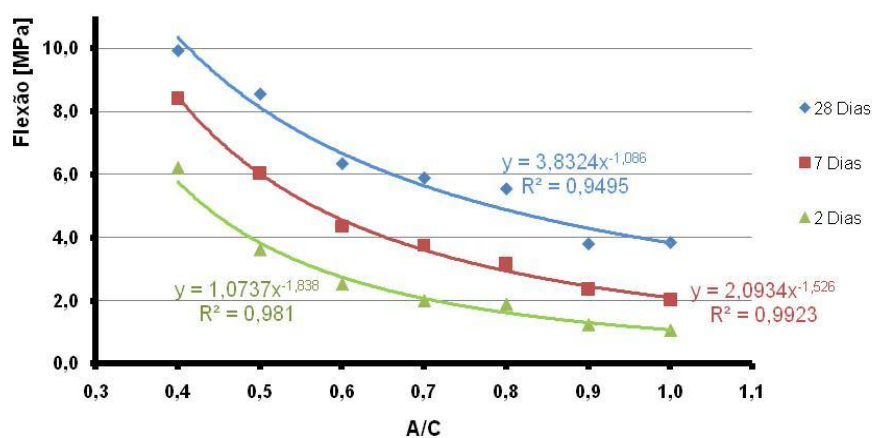


Figura 4.8 – Evolução dos valores da resistência à flexão obtida nas caldas com 2, 7 e 28 dias de idade e curadas em provetes paralelepípedicos.

Analisando a Figura 4.8 verifica-se que a resistência das caldas com 2, 7 e 28 dias de idade, curadas em provetes paralelepípedicos, diminui com o aumento da razão A/C. O aumento da razão A/C das caldas está associado ao aumento da quantidade de água em relação à quantidade de cimento. Desta forma, a matriz cimentícia que se forma ao longo do processo de cura das caldas fica menos densa, aumentando a porosidade das caldas com o aumento da razão A/C. Como a estrutura porosa se reflecte significativamente na resposta do material às solicitações que lhe são impostas, já que são zonas de capacidade resistente reduzida, o aumento da razão A/C está então associada a uma menor capacidade das caldas de resistirem, no estado endurecido, a cargas de flexão. Aos valores apresentados na Figura 4.8 foram ajustadas funções potenciais por serem as funções empíricas avaliadas para as quais se obteve melhor factor de correlação.

Na Figura 4.9 está representada a evolução ao longo do tempo dos valores da resistência à flexão das caldas para as diferentes razões A/C estudadas e curadas em provetes paralelepípedicos. Analisando a figura citada, verifica-se que independentemente do valor da razão A/C usada na preparação da calda, o valor das resistência à flexão aumenta com o período de cura das caldas. Martins [11] constatou a mesma tendência de aumento da resistência de argamassas à flexão ao longo do período da sua cura, até aos 28 dias de idade, num estudo que inclui a preparação de argamassas com razão A/C de 0,6, com razões cimento/areia diferentes e curadas em provetes paralelepípedicos. Ao longo do tempo de cura as ligações entre as partículas

de cimento vão-se consolidando, conferindo ao material uma maior capacidade resistente quando solicitado por uma força actuante.

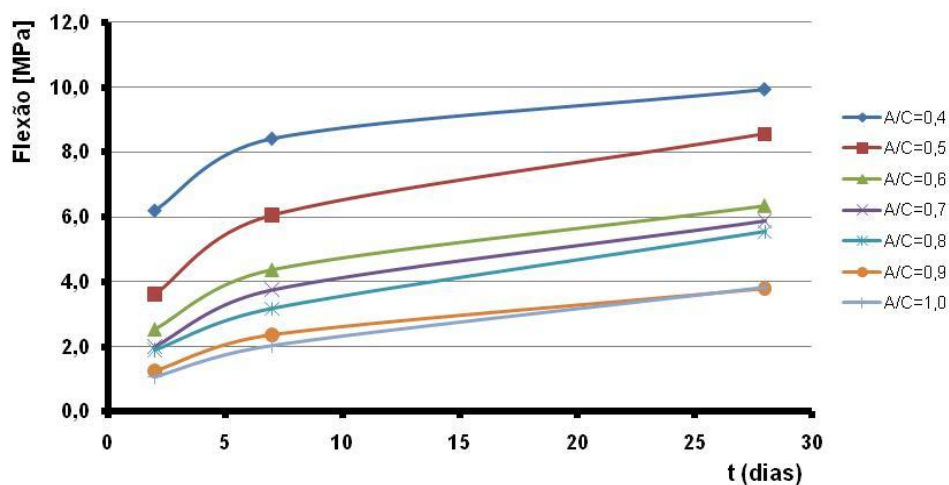


Figura 4.9 – Evolução dos valores da resistência à flexão ao longo do tempo das caldas para as diferentes razões A/C estudadas e curadas em provetes paralelepípedicos.

4.1.6.2 Resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos

Nas Figuras 4.10 e 4.11 representa-se a evolução, dos valores médios da resistência à compressão em função da razão A/C usada na preparação das caldas, obtidos nos provetes com 2, 7 e 28 dias de idade (que se apresentam na Tabela 4.5), curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, respectivamente.

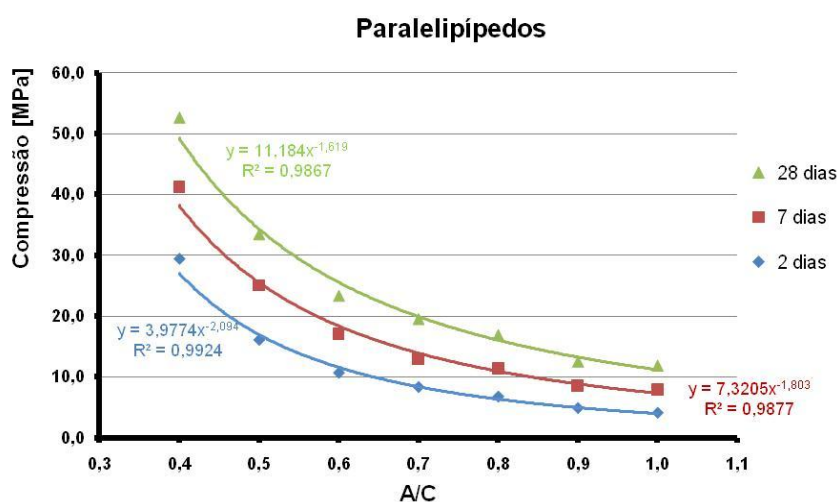


Figura 4.10 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 2, 7 e 28 dias de idade e curadas em provetes paralelepípedicos, por razão A/C estudada.

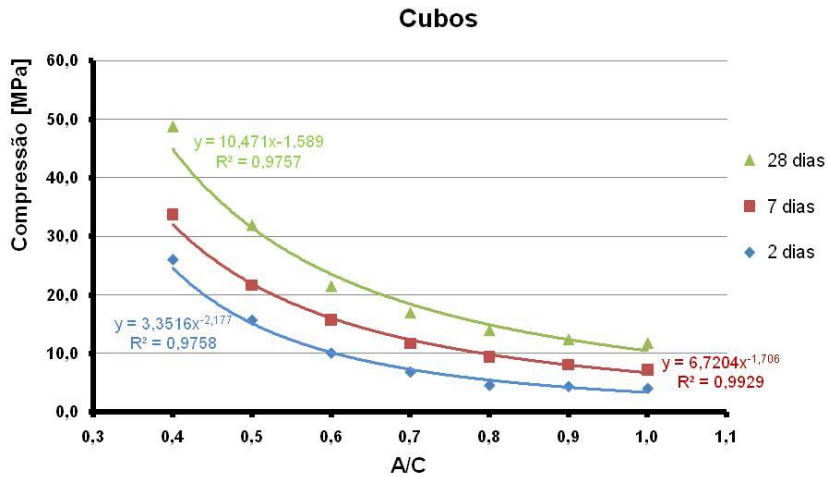


Figura 4.11 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 2, 7 e 28 dias de idade e curadas em provetes cúbicos, por razão A/C estudada.

Analisando as Figuras 4.10 e 4.11, verifica-se que a resistência das caldas com 2, 7 e 28 dias de idade, curadas quer em provetes paralelepípedicos quer em cúbicos, diminui com o aumento da razão A/C. Nestas figuras estão ainda representadas funções potenciais ajustadas à evolução ao longo do tempo dos valores de resistência à compressão. Funções desta natureza têm sido utilizadas em estudos que envolvem a correlação da resistência à compressão de materiais à base de cimento com a razão A/C [15; 16]. Estes resultados apresentam o mesmo andamento que se verificou para os resultados da resistência à flexão das caldas com os quais se verificou a sua diminuição com o aumento da razão A/C (secção 4.1.6.1).

Estes resultados vão ao encontro do conhecimento que se tem desde o principio do século XX de que a resistência à compressão dos materiais à base de cimento – betão e argamassas – diminui com o aumento da razão A/C [15; 16; 17] devido ao correspondente aumento progressivo da porosidade que conduz a um enfraquecimento da matriz à base de cimento. Nomeadamente, Abrams publicou em 1918 os resultados de um extenso trabalho experimental em que relacionou a resistência à compressão de betões e a razão A/C e que conduziu à formulação da lei de Abrams, no qual verificou a proporcionalidade inversa entre a resistência à compressão e a razão A/C de betões através da seguinte equação matemática:

$$f = AB^{-x}$$

Em que:

f – resistência compressão do betão;

A e B – parâmetros experimentais para uma dada idade, material e condições de cura;

x – razão A/C) [15; 17].

A norma NP EN 447:2008 [4], estabelece que a resistência à compressão de caldas de injeção para armaduras de pré-esforço com razões A/C inferiores a 0,44 e curadas em provetes paralelepípedicos, não deve ser inferior a 30 MPa aos 28 dias de idade das caldas. O REBAP, estabelece que a resistência à compressão de caldas de injeção de armaduras de pré-esforço curadas em provetes cúbicos, não deve ser inferior a 17 MPa aos 7 dias de idade das caldas. Tendo em conta os valores estabelecidos nas duas normas de referência para este trabalho, pode verificar-se, através dos valores apresentados na Tabela 4.5, que apenas os valores da resistência à compressão das caldas com razão A/C 0,4 e 0,5 cumprem o limite estabelecido pelas normas NP EN 447:2008 [4] e REBAP [2], aos 28 dias curadas em provetes paralelepípedicos e aos 7 dias curadas em provetes cúbicos, respectivamente.

Nas Figuras 4.12 e 4.13 representa-se a evolução ao longo do tempo dos valores médios da resistência à compressão (que se apresentam na Tabela 4.5) das caldas para as diferentes razões A/C estudadas e curadas, respectivamente, em provetes paralelepípedicos e cúbicos.

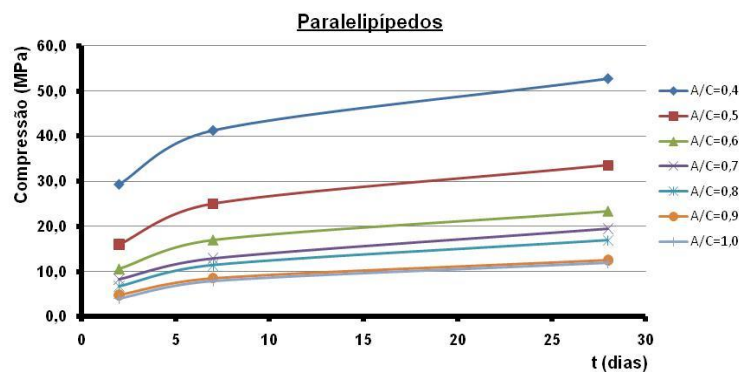


Figura 4.12 – Evolução dos valores da resistência à compressão ao longo do tempo das caldas para as diferentes razões A/C estudadas e curadas em provetes paralelepípedicos.

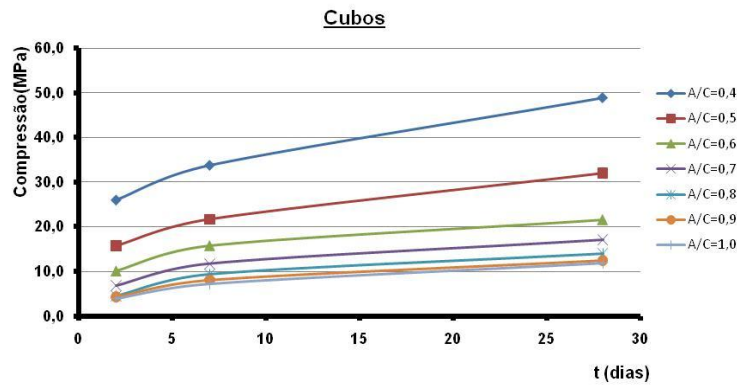


Figura 4.13 – Evolução dos valores da resistência à compressão ao longo do tempo das caldas para as diferentes razões A/C estudadas e curadas em provetes cúbicos.

Nas Figuras 4.12 e 4.13, verifica-se que os valores das resistências à compressão das caldas em todas as diferentes razões A/C estudadas e curadas, quer em provetes paralelepípedicos (Figura 4.12) quer em cúbicos (Figura 4.13), apresentam uma evolução crescente ao longo do tempo de cura das caldas. Este facto – explicável da mesma forma que se verificou o aumento da resistência à flexão ao longo do tempo das caldas (na secção 4.1.6.1) – deve-se ao facto de ao longo do tempo de cura das caldas, as ligações entre as partículas de cimento vão-se consolidando, conferindo ao material uma maior capacidade resistente quando solicitado por uma força actuante.

4.1.6.2.1 Reprodutibilidade dos resultados de resistência à compressão de caldas em provetes cúbicos, em relação à variação do equipamento de ensaio

Como já referido na secção 3.8.2.2, por motivos de avaria da prensa do Laboratório de Materiais de Construção do ISEL, os provetes cúbicos foram ensaiados à compressão em outras duas prensas, uma que se encontra no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Superior Técnico (IST) e outra no Laboratório de Betões e Cimentos, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Com o objectivo de avaliar a reprodutibilidade dos resultados obtidos nestes equipamentos de ensaio distintos, as resistências à compressão das caldas preparadas com razão A/C 0,7, com 2 dias de idade, e curadas nos provetes cúbicos foram determinadas nas três prensas.

Analisando os valores das resistências à compressão das caldas com razão A/C de 0,7 e com 2 dias de idade, curadas em provetes cúbicos, obtidos nos três equipamentos de ensaio utilizados (apresentados na Tabela I do Anexo V), verifica-se que o valor médio é $6,8 \pm 0,2$ MPa. Uma vez que apenas dois valores saem deste intervalo (assumindo os valores 7,1 e 6,5) e que não foi possível realizar uma análise

estatística mais rigorosa (porque o equipamento do ISEL avariou e o do IST tem uma disponibilidade limitada) decidiu-se assumir, neste trabalho, que os resultados da resistência à compressão dos provetes cúbicos se incluem na mesma amostra independentemente do equipamento de ensaio utilizado.

4.1.7 Relação entre a resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos

Nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, estão representadas as evoluções dos valores das resistências à compressão (que se apresentam na Tabela 4.5) em função da razão A/C de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, com 2, 7 e 28 dias de idade, respectivamente.

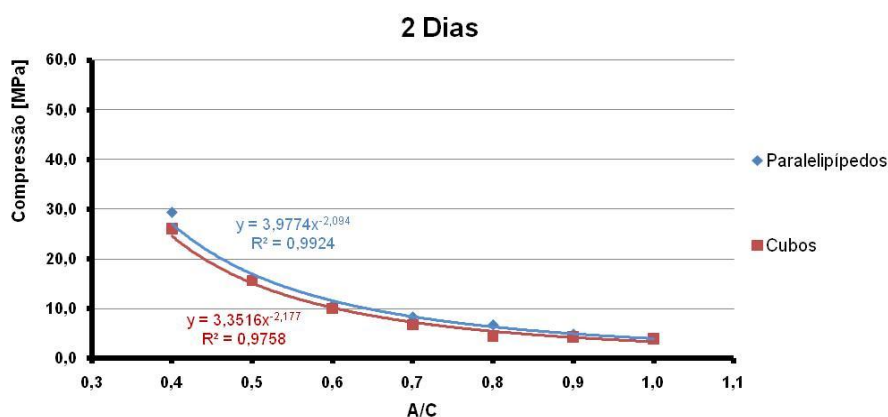


Figura 4.14 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 2 dias de idade curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, em função da razão A/C usada na preparação da calda.

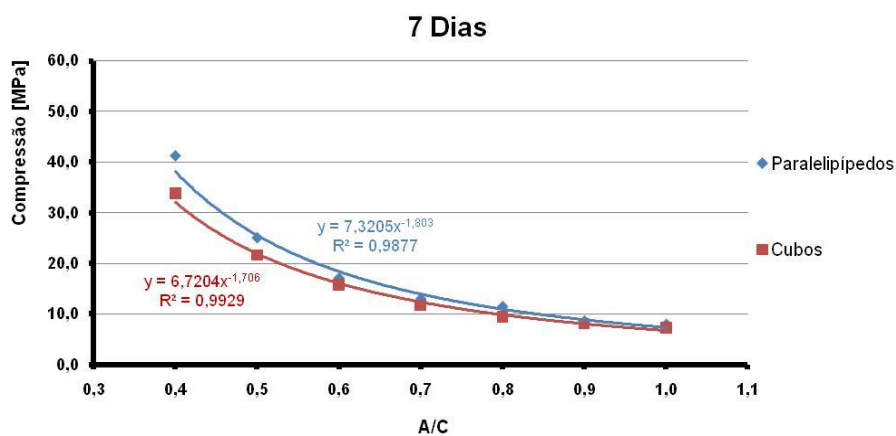


Figura 4.15 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 7 dias de idade curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, em função da razão A/C usada na preparação da calda.

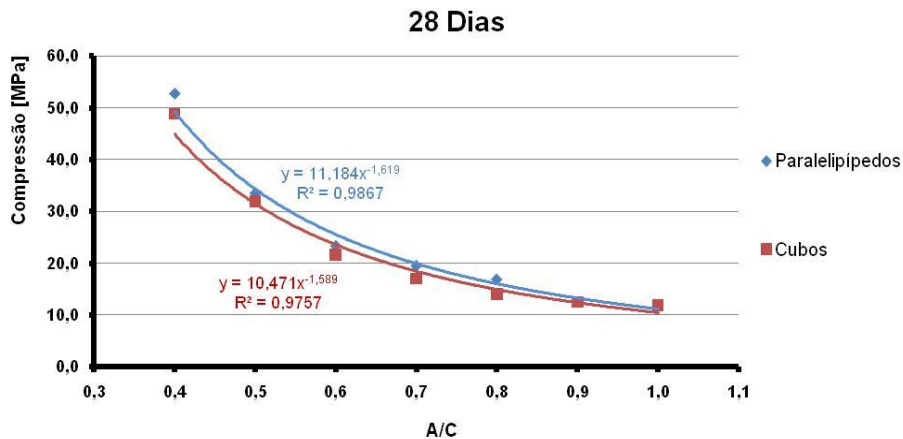


Figura 4.16 – Evolução dos valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 28 dias de idade curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, em função da razão A/C usada na preparação da calda.

Nas três Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, ou seja, para todas as idades de cura (2, 7 e 28 dias) verifica-se um comportamento similar das resistências das caldas curadas quer em provetes paralelepípedicos quer em cúbicos, confirmando-se a diminuição do seu valor com o aumento da razão A/C, já analisada nas Figuras 4.10 e 4.11, e verifica-se uma superioridade dos valores das resistências das caldas curadas em provetes paralelepípedicos do que em cúbicos. Aos valores apresentados nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 foram ajustadas funções potenciais (cujas expressões matemáticas se encontram escritas também nas Figuras referidas), por ser com estas funções que se obtiveram os melhores factores de correlação, de todas as funções que foram avaliadas.

A Figura 4.17 representa a evolução ao longo do tempo dos valores das resistências à compressão (que se apresentam na Tabela 4.5) das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, para as diferentes razões A/C estudadas. Analisando as referidas figuras, verifica-se que as resistências à compressão em caldas curadas em provetes paralelepípedicos são sistematicamente superiores às curadas em provetes cúbicos, embora essa diferença seja menos visível para as razões A/C de 0,9 e 1,0, do que para as razões A/C menores.

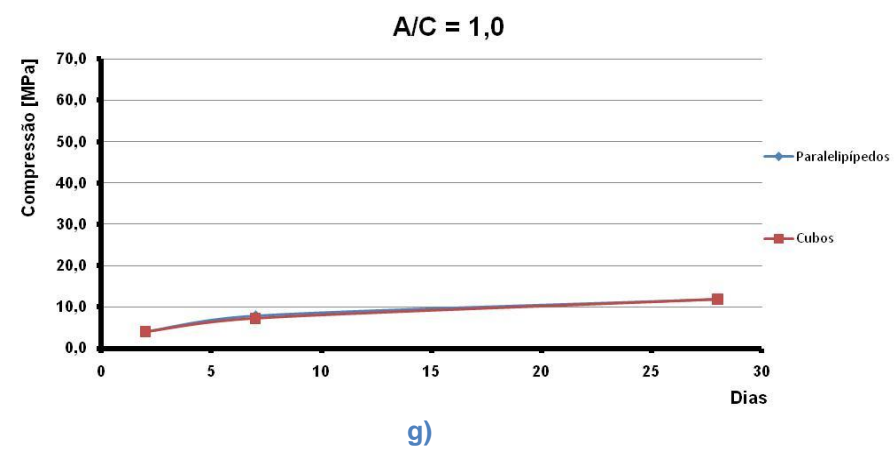
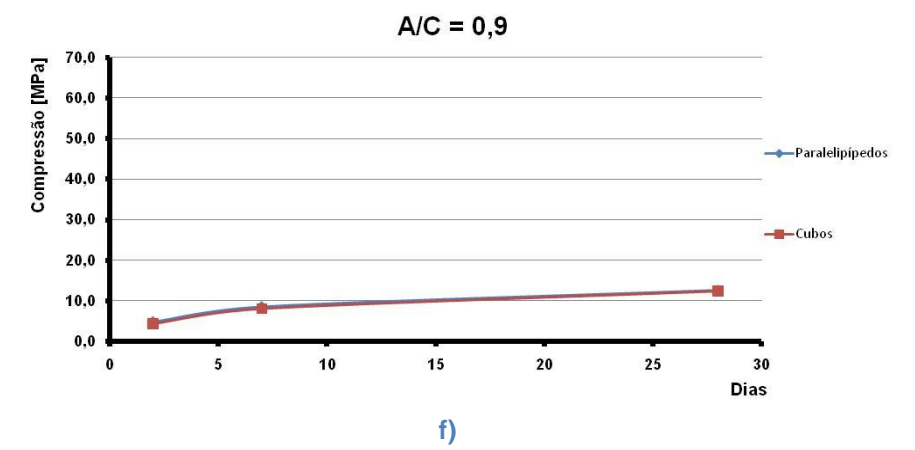
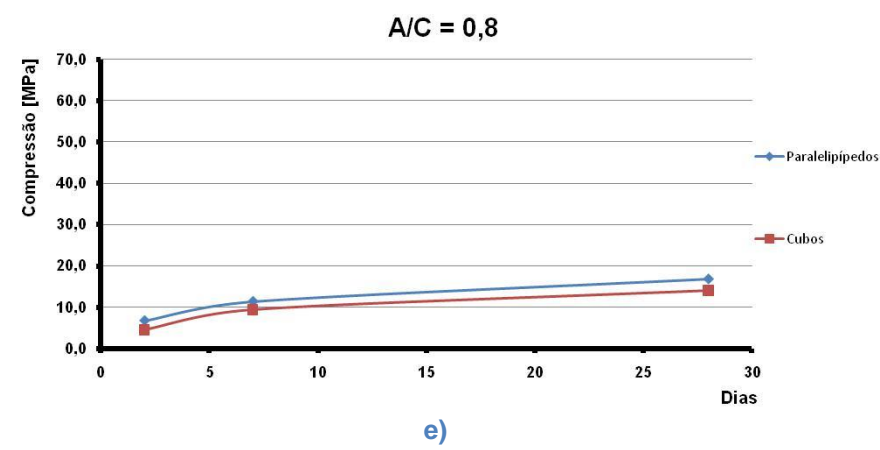
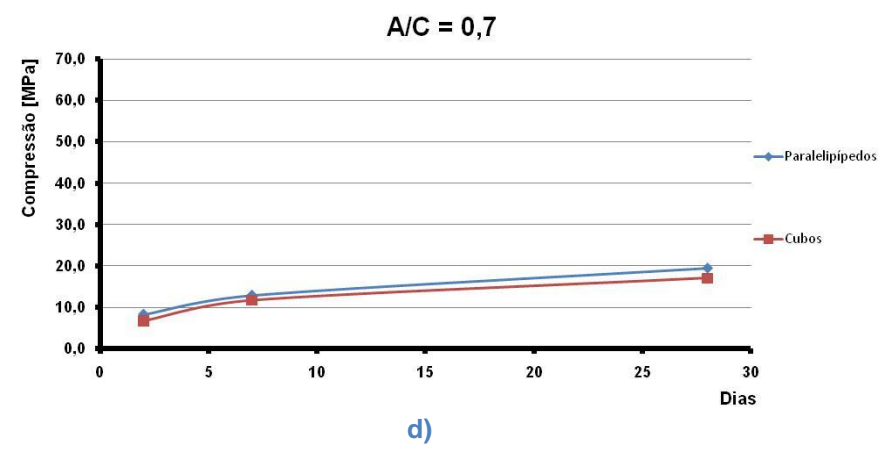
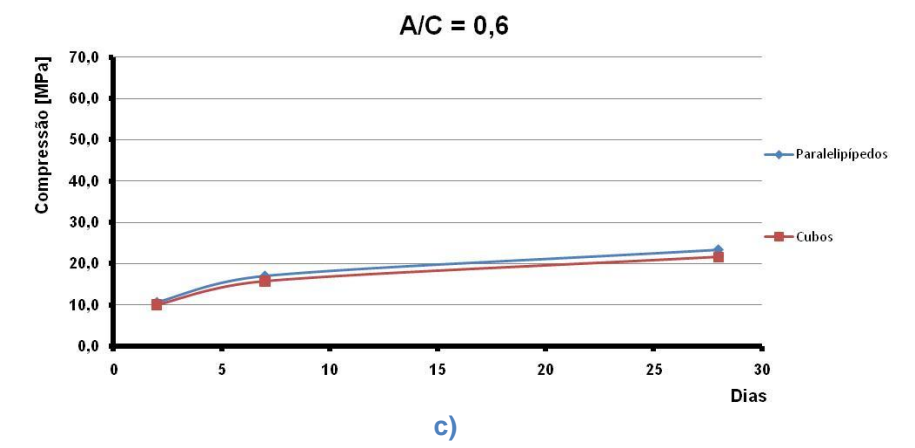
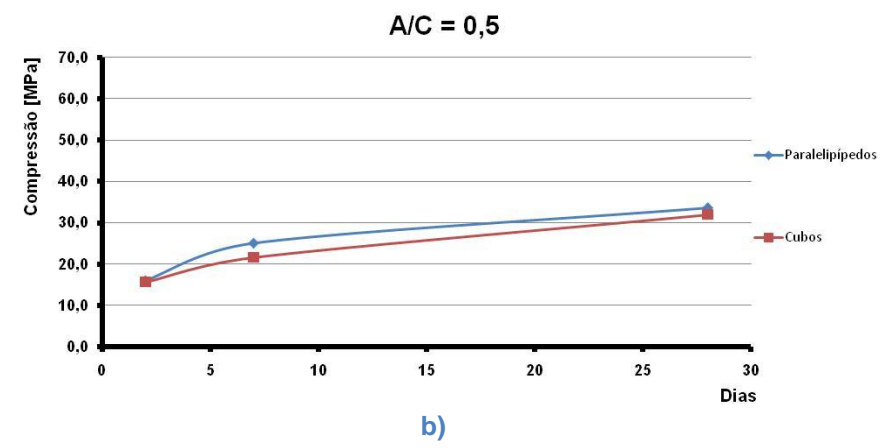
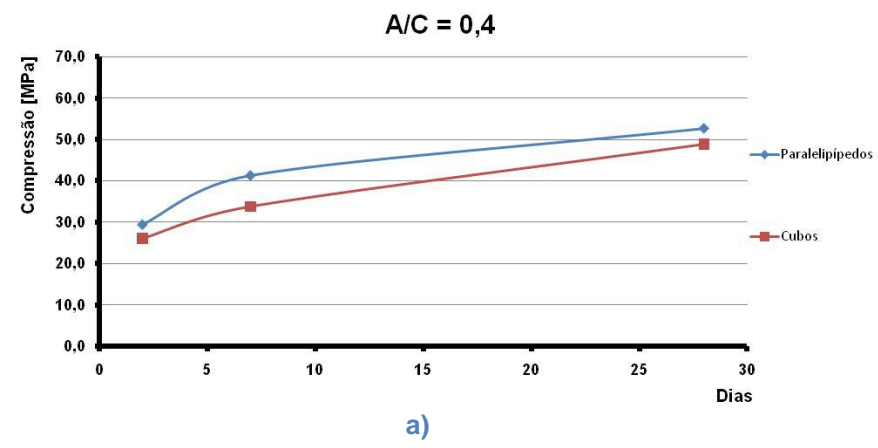


Figura 4.17 – Evolução dos valores da resistência à compressão ao longo do tempo das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, para cada razão A/C estudada:

a) A/C = 0,4; b) A/C = 0,5; c) A/C = 0,6; d) A/C = 0,7; e) A/C = 0,8; f) A/C = 0,9; g) A/C = 1,0.

Da análise das Figuras 4.14 a 4.17, concluiu-se que os resultados das resistências à compressão das caldas, ao longo do tempo e para as diferentes razões A/C estudadas, são superiores quando curadas em provetes paralelepípedicos do que em cúbicos. A causa provável dessa tendência deve residir no confinamento a que estão sujeitos os provetes paralelepípedicos e cúbicos nos respectivos equipamentos de ensaio das caldas. Em relação aos provetes paralelepípedicos, a área de superfície de contacto do provete com os cutelos da prensa é superior à área desses cutelos do equipamento de ensaio, que imprimem a carga na amostra de ensaio. No caso dos provetes cúbicos, estes são sujeitos a um confinamento em que os cutelos da prensa de ensaio têm uma área superior à da superfície do provete. Desta forma, a dissipação da força de compressão nos provetes paralelepípedicos pode efectuar-se para as extremidades do provete, fazendo com que seja necessária uma força superior para obter a sua rotura, o que pode constituir uma explicação para a calda de cimento curada em provetes paralelepípedicos apresentar uma resistência superior do que quando a mesma calda foi curada num provete cúbico.

Na Figura 4.18, encontram-se representados os valores de resistência à compressão de uma argamassa produzida de acordo com o disposto na norma NP EN 196-1:2006 [23] para avaliar a resistência dos cimentos, usando o mesmo cimento do utilizado nas caldas objecto de estudo neste trabalho e com uma razão A/C de 0,5.

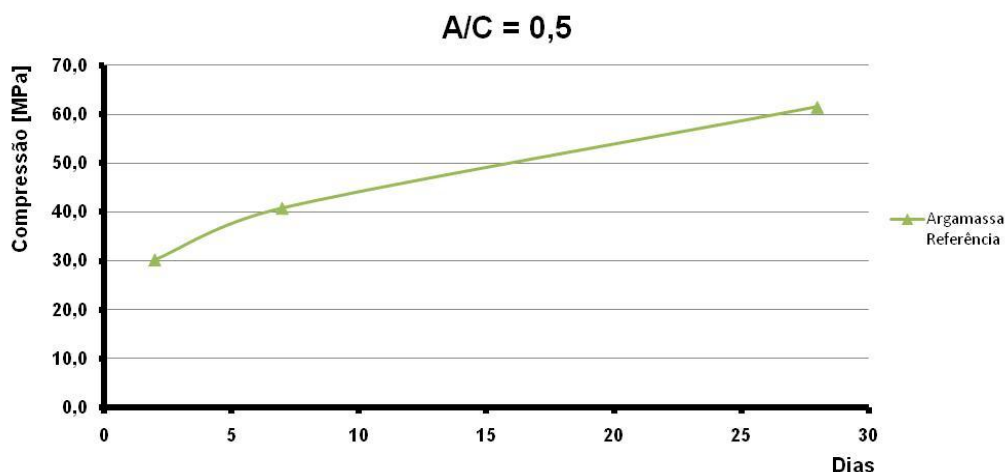


Figura 4.18 – Evolução dos valores da resistência à compressão ao longo do tempo de uma argamassa de cimento produzida de acordo com o disposto na norma NP EN 196-1:2006 [23], usando o mesmo cimento caldas e com uma razão A/C de 0,5.

Na análise comparativa dos valores representados na Figura 4.18 e os valores da resistência à compressão das caldas com razão A/C de 0,5 e curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, que estão representados na Figura 4.17, verifica-se que ambas as tendências dos valores é crescente ao longo do tempo. No caso da

argamassa os valores das resistências à compressão registados apresentam-se superiores aos valores das resistências à compressão nas caldas curadas quer em provetes paralelepípedicos quer em cúbicos, o que seria de esperar, já que a argamassa contém na sua constituição uma areia calibrada com diferentes granulometrias, que juntamente com o cimento formam uma matriz cimentícia mais consolidada e densa durante o processo de cura do material, conferindo uma maior resistência mecânica em relação às caldas de cimento, que são constituídas apenas por água e cimento.

Na Figura 4.19 apresenta-se a relação entre os valores obtidos das resistências à compressão das caldas com 2, 7 e 28 dias de idade com as diferentes razões A/C estudadas, curadas em provetes paralelepípedicos, com os valores das resistências à compressão das mesmas caldas mas curadas em provetes cúbicos. A recta de ajuste linear e a respectiva equação matemática também se apresentam na Figura 4.19.

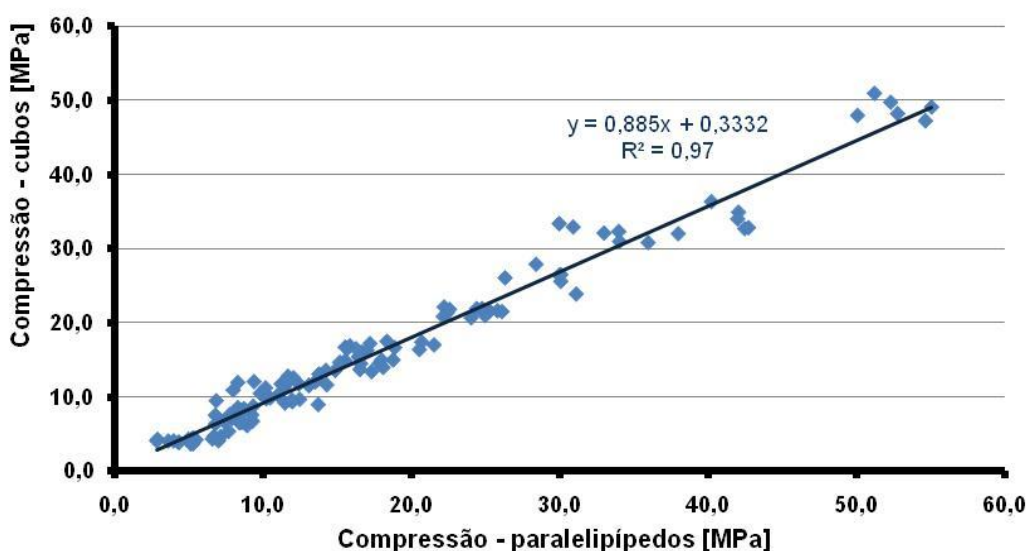


Figura 4.19 – Relação entre os valores da resistência à compressão das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e em provetes cúbicos.

Analisando o factor de correlação obtido ($R^2 = 0,97$) com o ajuste da função linear aos valores apresentados, pode concluir-se que a relação entre os valores da resistência à compressão das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e os valores da resistência à compressão das mesmas caldas curadas em provetes cúbicos é directa. Desta forma, através da equação apresentada na Figura 4.19, é possível determinar o valor da resistência à compressão de uma calda curada em provetes paralelepípedicos a partir do valor da resistência à compressão dessa calda curada em provetes cúbicos, e vice-versa.

4.1.8 Relação da resistência à compressão e velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos

Na Figura 4.20 está representada a relação entre os valores da resistência à compressão (Tabela 4.5), analisados na secção 4.1.6.2, e os valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (Tabela 4.4), analisados na secção 4.1.5, obtidos em caldas com 2, 7 e 28 dias de idade com razão A/C de 0,5, curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos. As duas séries de resultados – das caldas curadas com provetes paralelepípedicos e com provetes cúbicos – foram ajustadas duas funções exponenciais cujas respectivas expressões se apresentam na Figura 4.20. Funções desta natureza foram também adoptadas na correlação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em caldas de cimento estudadas por Rosquiet *et al.* [3].

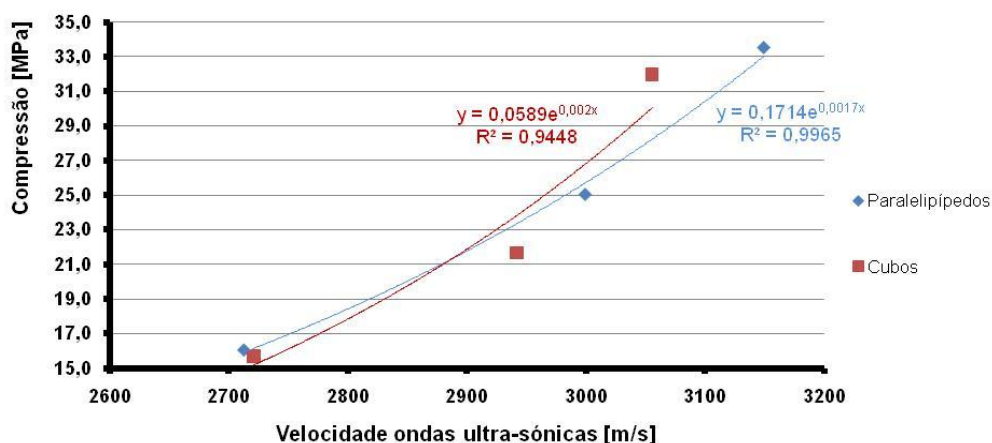


Figura 4.20 – Relação entre os valores da resistência à compressão e da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos em caldas de cimento com razão A/C = 0,5, curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, ao longo do período de cura (2, 7 e 28 dias).

Analisando a evolução dos valores e das funções ajustadas verifica-se que os valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas aumentam com o aumento da resistência à compressão das caldas, curadas quer em provetes paralelepípedicos quer em cúbicos. Ao longo do processo de cura das caldas as ligações entre as partículas de cimento vão-se consolidando, tornando o material cada vez mais rígido e compacto. Desta forma, e não havendo fenómenos de retracção que originem fissuras no interior das caldas, a matriz cimentícia vai-se tornando cada vez mais densa ao longo do tempo, diminuindo assim os vazios que possam existir no interior do material, nomeadamente, a sua porosidade. Neste sentido, é explicável o aumento da

velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas com o aumento da resistência à compressão das caldas, ao longo do tempo.

De referir ainda que na Figura 4.20 pode verificar-se que as duas funções representadas se intersectam num ponto. No entanto, a quantidade de ensaios desenvolvidos não permitiu realizar um estudo mais exaustivo (dado que o equipamento avariou e não ficou disponível em tempo útil) para tentar compreender a razão pela qual se verifica esta inversão.

4.1.9 Relação entre a massa volúmica e resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos

Nas Figuras 4.21 e 4.22 está representada a relação entre os valores da massa volúmica (apresentados na Figura 4.1 – secção 4.1.2) e os valores da resistência à compressão obtidos nas caldas com 2, 7 e 28 dias de idade (apresentados na Tabela 4.5 – secção 4.1.6), curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, respectivamente.

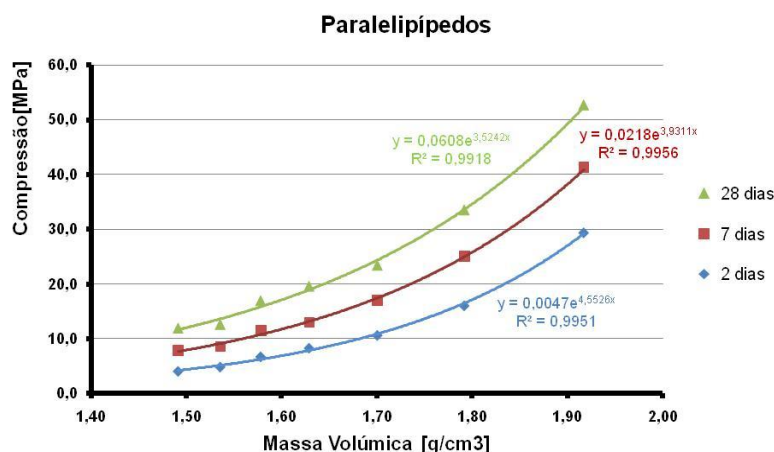


Figura 4.21 – Relação entre os valores da resistência à compressão e da massa volúmica obtidos em caldas com 2, 7 e 28 dias de idade, curadas em provetes paralelepípedicos.

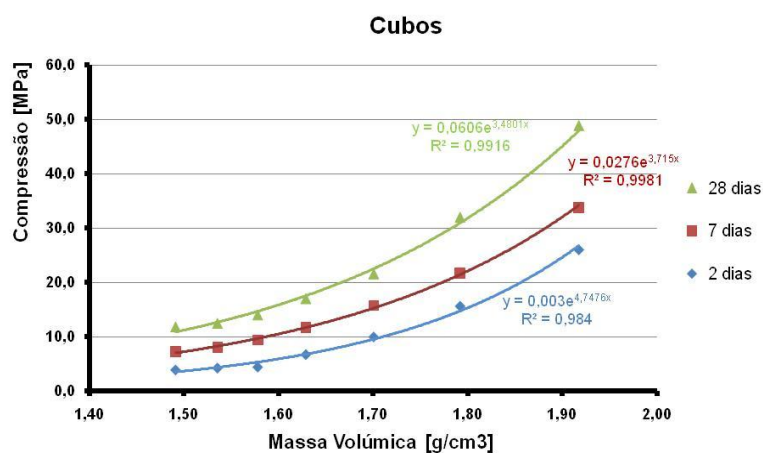


Figura 4.22 – Relação entre os valores da resistência à compressão e a massa volúmica obtidos em caldas com 2, 7 e 28 dias de idade, curadas em provetes cúbicos.

Analisando as figuras apresentadas verifica-se que os valores da resistência à compressão das caldas com 2, 7 e 28 dias de idade aumentam com o aumento do valor da massa volúmica das mesmas caldas, quer sejam curadas em provetes paralelepípedicos quer em cúbicos. Esta evolução era esperada uma vez que o aumento da massa volúmica está associado a uma menor porosidade das caldas, originada pela densificação e consolidação da matriz cimentícia. A quantidade e dimensão dos poros das caldas constituem descontinuidades no seu interior que conferem uma menor capacidade resistente às caldas de cimento. Nesse sentido, o aumento da massa volúmica das caldas, e conseqüente diminuição da porosidade e o aumento da consolidação das ligações entre as partículas de cimento, conferem às caldas uma maior resistência à compressão.

Nas Figuras 4.21 e 4.22 estão apresentadas também as expressões das funções exponenciais que foram ajustadas às relações apresentadas entre a massa volúmica e a resistência à compressão das caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, para as quais se obtém um bom factor de correlação ($R^2 > 0,98$).

4.2 CALDAS DE CIMENTO PREPARADAS *IN SITU* (OBRA)

Na obra que a empresa RODIO realizou em (referida na secção 2.8) foram preparadas nove caldas em que se pretendia uma razão A/C de 0,5 com o objectivo de comparar os resultados da resistência à compressão de caldas preparadas laboratório e curadas em condições de humidade temperatura controlada com os resultados de argamassas preparadas com o mesmo cimento mas em obra e curadas, no mesmos provetes, *in situ* durante 24 horas. Assim, para cada amassadura preparada foram preenchidos com calda três moldes paralelepípedicos e três moldes cúbicos, com excepção da primeira em que foram moldados apenas moldados cubos. Os provetes obtidos por cada molde foram ensaiados aos 2, 7 e 28 dias de idade das caldas. Assim, por cada calda preparada foram ensaiados três provetes paralelepípedicos e dois cúbicos em cada idade de cura das amostras.

O tratamento dos resultados foi efectuado da mesma forma e recorrendo às equações 3.3 e 3.4, apresentadas na secção 3.8.2. Os valores obtidos estão incluídos na Tabela I do Anexo VI. Na Figura 4.23 encontram-se representados:

- os valores médios das resistências à compressão aos 2, 7 e 28 dias de idade das caldas, obtidos tanto em provetes paralelepípedicos como em cúbicos, tornando mais compreensível a evolução dos resultados dos ensaios;

- os resultados das resistências à compressão das caldas curadas preparadas em laboratório com razão 0,5 e 0,6, em provetes paralelepípedicos e cúbicos,. Pretende-se com isto comparar os valores das resistências das caldas preparadas em obra com os resultados obtidos em amassaduras produzidas num ambiente controlado como o do laboratório.

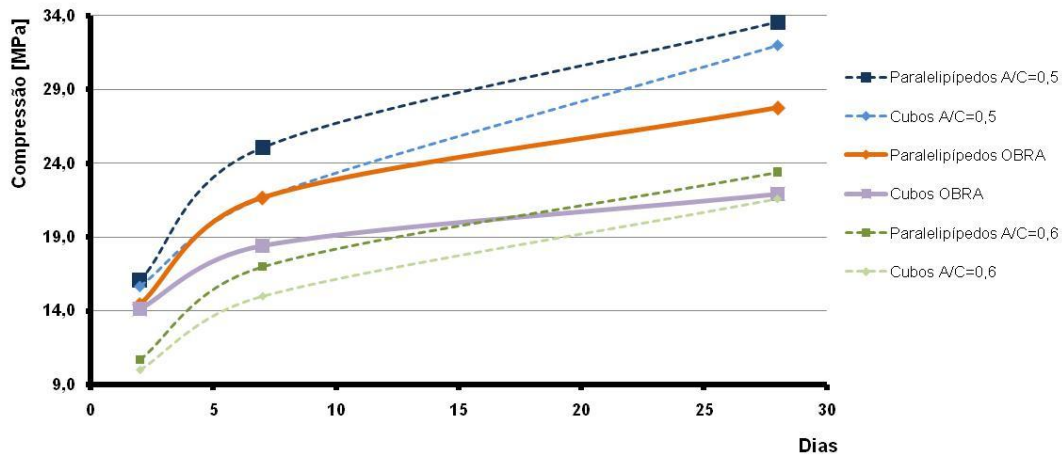


Figura 4.23 – Evolução dos valores da resistência à compressão de caldas preparadas *in situ* e das caldas com razões A/C de 0,5 e 0,6 preparadas em laboratório.

Numa primeira abordagem verifica-se a mesma tendência analisada para as caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos no laboratório, em que os valores de resistência das caldas curadas em provetes paralelepípedicos são sistematicamente superiores aos valores de resistência das caldas curadas em provetes cúbicos, ao longo do período de cura das mesmas.

Tendo em conta que as caldas a serem utilizadas em obra deveriam ser preparadas com uma relação A/C de 0,5, verifica-se que tanto em provetes paralelepípedicos como em provetes cúbicos, os valores das resistências das caldas são inferiores à referência preparada em laboratório com a razão 0,5, e apresentam valores superiores à referência preparada com razão 0,6. A explicação para este facto reside no facto, de na altura da preparação das amassaduras *in situ* introduziu-se 70 litros de água na cuba da UNIGROUT (valor marcado no contador de litros do equipamento), colocando depois três sacas de cimento de 40 Kg. O quociente entre estes dois valores dá uma razão A/C de 0,58, confirmando assim os resultados situados entre as razões 0,5 e 0,6.

Refira-se que as caldas moldadas em obra apresentavam uma ligeira fendilhação, nomeadamente os provetes cúbicos, que para os 28 dias apresentam uma resistência

praticamente idêntica à obtida para o mesmo tipo de provetes produzidos em laboratório com uma razão 0,6. A fendilhação poderá ter sido promovida pelas condições de cura que não ocorrem em ambiente de humidade e temperatura controlados e pode constituir a justificação para os valores mais baixos da resistência das caldas preparadas *in situ*.

Neste caso, o factor fundamental da dispersão de resultados das resistências obtidas nas caldas obtidas *in situ* em relação às que foram produzidas em laboratório, parece residir na reprodutibilidade do procedimento de mistura utilizado em obra. Os resultados obtidos indiciam o interesse em desenvolver um estudo mais sistemático de preparação e cura de caldas *in situ* e comparação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão destas caldas com as de caldas preparadas e curadas em laboratório com o mesmo cimento e razão A/C. Um estudo desta natureza contribuiria para:

- o aumento da sensibilidade em relação ao efeito de variações na realização experimental na dispersão dos resultados dos ensaios das caldas de cimento preparadas *in situ*;
- definição de protocolo experimental que aumentasse a reprodutibilidade das caldas preparadas *in situ*;
- determinação de correlação entre os resultados de caldas preparadas *in situ* e no laboratório. Esta correlação concorre para preparação de caldas *in situ* que permitam prever o seu comportamento durante a aplicação e o seu desempenho final, bem como para a avaliação da correspondência das caldas às exigências do projecto e às necessidades de qualidade e economia.

4.3 CALDAS DE CIMENTO PREPARADAS *IN SITU* (NAS INSTALAÇÕES DA RODIO)

Nesta fase da campanha experimental foram preparadas duas caldas (secção 3.5), com razão A/C 0,5. A primeira foi preparada numa betoneira tradicional (Figura 3.8), através do protocolo sistematizado na Tabela 3.5. A segunda calda foi preparada com o mesmo equipamento mecânico (UNIGROUT – Figura 3.5) utilizado para a preparação das caldas *in situ*, na obra descrita na secção 2.8, através do protocolo que se encontra sistematizado na Tabela 3.4.

Com estas duas caldas determinaram-se as suas resistências à compressão em provetes paralelepípedicos e cúbicos, e determinaram-se as suas tensões de rotura ao

nível do bolbo de selagem de recobrimento de microestacas, preparadas segundo o protocolo sistematizado na Tabela 3.10, com o objectivo de correlacionar os valores obtidos nos dois ensaios.

Os ensaios de resistência à compressão e da tensão de rotura de cada calda foram efectuados aos 1, 2, 3 e 4 dias (a injeção de selagem de microestacas em obra é efectuada entre estes dias, após a injeção de preenchimento) após a moldagem dos provetes paralalipédicos e cúbicos, e das microestacas. Por cada dia de ensaio foram moldados três paralelepípedos e duas amostras de microestacas. Os provetes cúbicos foram moldados apenas para os dois primeiros dias de ensaio, uma vez que não estavam disponíveis mais moldes.

Na Tabela 4.6 encontram-se os valores médios obtidos nos ensaios de resistência mecânica de compressão das duas caldas em provetes paralelepipedicos e cúbicos, e também os resultados da determinação da tensão de rotura das mesmas caldas ao nível do bolbo de selagem de recobrimento das microestacas.

Tabela 4.6 -- Valores das resistências à compressão e tensão de rotura das caldas de cimento preparadas *in situ* com a betoneira tradicional e com o misturador mecânico UNIGROUT.

Idade da calda [Dias]	Calda preparada com betoneira tradicional			Calda preparada com UNIGROUT		
	Resistência compressão provetes [MPa]		Tensão rotura microestacas [MPa]	Resistência compressão provetes [MPa]		Tensão rotura microestacas [MPa]
	Cubos	Paralelepípedos		Cubos	Paralelepípedos	
1	15,6	8,1	1,2	13,2	5,6	0,8
2	19,2	17,7	1,4	15,8	13,8	1,4
3	-	20,5	2,2	-	16,1	1,9
4	-	23,0	1,9	-	17,6	1,2

Comparando os valores obtidos nas caldas preparadas em cada equipamento verifica-se que, a calda misturada na betoneira tradicional apresenta resultados de resistência à compressão em paralelepípedos e cubos, e de tensão de rotura nas micro-estacas, sistematicamente superiores, em todos os dias de ensaio, aos que são obtidos na calda preparada com a UNIGROUT.

Os valores das resistências à compressão de ambas as caldas preparadas, determinadas quer em provetes paralelepipedicos quer em cúbicos, registam um aumento ao longo dos dias de ensaio estabelecidos. Comparando os valores obtidos nas caldas curadas em provetes paralelepipedicos com os determinados em caldas curadas em provetes cúbicos, regista-se uma superioridade dos primeiros em relação aos segundos.

Os resultados das tensões de rotura de ambas as caldas nas microestacas aumentam o seu valor até ao terceiro dia de ensaio, registando uma diminuição do terceiro para o quarto dia. Este facto não era previsto dado que ao longo do tempo, os materiais constituintes das caldas de cimento vão adquirindo maior rigidez, reflectindo-se no aumento das suas resistências.

Na Figura 4.24 está representada a relação entre os valores da resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e os valores da tensão de rotura das mesmas caldas ao nível do bolbo de selagem das microestacas (apresentados na Tabela 4.6), preparadas com a betoneira tradicional e com o misturador mecânico UNIGROUT.

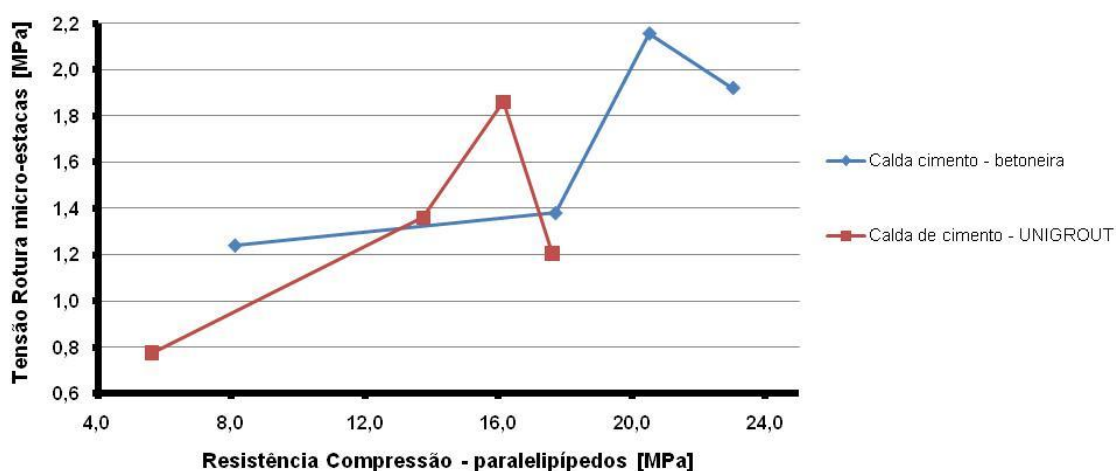


Figura 4.24 – Evolução da relação entre a resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e os valores da tensão de rotura das mesmas caldas em microestacas, preparadas com betoneira tradicional e misturador mecânico UNIGROUT.

Analisando os valores representados na Figura 4.24, verifica-se que tanto a relação obtida para as caldas preparadas na betoneira tradicional como no misturador mecânico UNIGROUT apresenta uma evolução irregular ao longo do tempo, aumentando até aos 3 dias de idade das caldas e sofrendo uma diminuição acentuada do terceiro para o quarto dia. Desta forma, a diminuição do valor da relação apresentada na Figura 4.24 do terceiro para o quarto dia de idade das caldas preparadas com a betoneira tradicional e com o misturador mecânico UNIGROUT, poderá estar associada a deficiências na moldagem das amostras das microestacas simuladas ou relacionada com o ambiente de cura a que estiveram sujeitas (secção 3.6.6), podendo mesmo assumir-se a existência de fenómenos de retracção que tenham originado uma diminuição da capacidade resistente da calda. No entanto, importa referir que a quantidade reduzida de ensaios desenvolvidos é manifestamente

insuficiente para compreender esta tendência que se verificou na relação apresentada na Figura 4.24.

5. CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Na primeira fase da campanha experimental deste trabalho realizou-se um estudo no laboratório para (i) avaliar a sensibilidade das propriedades das caldas de cimento, em relação a variações no procedimento da sua preparação (ii) correlacionar as propriedades das caldas no estado fresco e no estado endurecido, nomeadamente a resistência mecânica e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, com a razão A/C usada na preparação das caldas, e (iii) comparar os resultados da resistência mecânica e velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em caldas moldadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos de acordo com as actuais normas em vigor, respectivamente NP EN 447:2008 [4] e Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP) [2].

Posteriormente, realizou-se uma fase da campanha experimental na qual as caldas foram preparadas *in situ* com o objectivo de, comparar os resultados da resistência mecânica destas caldas com os mesmos resultados nas caldas preparadas em laboratório e, ainda, correlacionar a resistência mecânica de caldas moldadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos com a tensão de rotura das mesmas caldas ao nível do bolbo de selagem de recobrimento de microestacas.

A análise dos resultados obtidos durante a campanha experimental desenvolvida permitiu obter as seguintes conclusões:

- Nas caldas preparadas em laboratório com razão A/C igual a 0,5, a variação do equipamento de mistura – misturador de pá e de hélice – e da sequência de introdução dos constituintes não condicionam os valores das propriedades (massa volúmica, teor em ar e resistência mecânica) e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas obtidos nas caldas estudadas (secção 4.1.1).
- O aumento da razão A/C entre 0,4 e 1,0 com incremento de 0,1 na preparação de caldas conduz à diminuição do valor da massa volúmica das caldas no estado fresco. Esta diminuição ajusta-se a uma função potencial com um factor de correlação (R^2) superior a 0,99 (secção 4.1.2).
- O aumento da razão A/C entre 0,4 e 1,0 com incremento de 0,1 usada na preparação de caldas conduz ao aumento do teor de ar das caldas no estado

fresco (secção 4.1.3). No entanto, não foi possível ajustar estas duas grandezas com uma função à qual estivesse associada um bom factor de correlação. O mesmo se constatou quando se pretendeu correlacionar o teor em ar com a massa volúmica das caldas (secção 4.1.3.1).

- Os valores de início e fim de presa aumentam quando a razão A/C aumenta entre 0,4 e 1,0 com incremento de 0,1. Para estas formulações das caldas verifica-se, ainda, que os valores admissíveis de início e fim de presa referidos na norma NP EN 447:2008 [4] (secção 2.5) são cumpridos. O aumento dos valores de início e fim de presa ajustam-se a uma função linear com um factor de correlação (R^2) de 0,93 e 0,95, respectivamente (secção 4.1.4).
- O aumento da razão A/C entre 0,4 e 1,0 com incremento de 0,1 usada na preparação das caldas conduz à diminuição da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas tanto em caldas curadas em provetes paralelepípedicos como em cúbicos. Comparando os valores obtidos das caldas em provetes paralelepípedicos e cúbicos, constata-se que a geometria dos provetes influencia os valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas uma vez que se verifica que os resultados obtidos em caldas moldadas em paralelepípedos são superiores aos das caldas moldadas em cubos (secção 4.1.5). Não foi possível realizar um estudo mais exaustivo sobre a correlação da resistência mecânica e da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos uma vez que a quantidade de ensaios foi manifestamente insuficiente (dado que o equipamento avariou e não ficou disponível em tempo útil) para tentar compreender a tendência evidenciada pelos valores que relacionam a resistência mecânica e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas nas caldas estudadas no trabalho desenvolvido.
- De acordo com o conhecimento consolidado para o betão e para argamassas de cimento – enunciados inicialmente por Ferret e Abrams no princípio do século XX – [15; 16; 17], o aumento da razão A/C contribui para a diminuição da resistência mecânica das caldas de cimento. A correlação destas duas grandezas ajusta-se a funções potenciais com factores de correlação (R^2) superior a 0,98 no caso de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e superior a 0,97 no caso de caldas curadas em provetes cúbicos (secção 4.1.6.2). Tanto quanto é do conhecimento do autor deste trabalho, a generalização destas correlações entre a resistência mecânica e razão A/C usada na preparação de caldas não tinha antes sido publicada em trabalhos de natureza técnico-científica.

- Na comparação dos valores das resistências das caldas com a mesma composição – com razão água cimento entre 0,4 e 1,0 – e preparadas de acordo com o mesmo procedimento experimental, mas curadas em provetes paralelepípedicos e em provetes cúbicos, constata-se que **nas caldas curadas com geometria paralelepípedica os valores da resistência são sistematicamente superiores aos das cúbicas** (secção 4.1.7). A correlação entre estes valores de resistência mecânica de caldas curadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos ajusta-se, com um factor de correlação (R^2) de 0,97, à seguinte equação linear:

$$r_c = 0,885r_p + 0,3332$$

Em que:

r_c – resistência à compressão de caldas curadas em provetes cúbicos

r_p – resistência à compressão de caldas curadas em provetes paralelepípedicos

Estes resultados – concretamente (i) de que a resistência de caldas curadas em provetes paralelepípedicos (previstos pela NP EN 447:2008 [4]) são sistematicamente superiores aos das curadas em provetes cúbicos (previstos pelo REBAP [2]) e (ii) de que a correlação entre estas duas resistências, para a gama de razões A/C estudada, se ajusta a uma recta com elevado factor de correlação – afigura-se da maior importância para as empresas que trabalham com caldas de cimento. Particularmente nesta fase de transição - em que embora ainda estejam em vigor as duas normas – o tradicional recurso ao REBAP [2] será substituído, por imposição legal, num futuro próximo, pelas especificações da NP EN 447:2008 [4]. Tanto quanto é do conhecimento do autor deste trabalho, a correlação entre os resultados obtidos pelas duas normas em vigor para caldas de cimento NP EN 447:2008 [4] e REBAP [2] não tinha antes sido publicada em trabalhos de natureza técnica ou científica.

- À semelhança das caldas preparadas em laboratório, as resistências das caldas preparadas *in situ* determinadas em provetes paralelepípedicos são superiores aos que são determinados em cubos. Contudo os valores dos resultados da resistência obtidos para as caldas preparadas no laboratório e *in situ*, neste trabalho, não se revelaram comparáveis porque o procedimento de mistura das caldas *in situ* não foi reprodutível estando associado a variações na sua preparação que se reflectem também na dispersão significativa de resultados,.

- Nas caldas preparadas no âmbito deste trabalho, não se verificou uma relação entre a resistência mecânica de caldas moldadas em provetes paralelepípedicos e cúbicos e a tensão de rotura das mesmas caldas ao nível do bolbo de selagem de recobrimento das microestacas simuladas. A dificuldade na obtenção da correlação está associada ao facto da quantidade de ensaios realizados ser manifestamente insuficiente para avaliar a tendência obtida.

5.2 PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

Este estudo poderá ser complementado se, partindo das bases que aqui foram delineadas e das conclusões tiradas, for dada continuidade no sentido de aumentar o conhecimento sobre as caldas de cimento de injeção em trabalhos de geotecnia, avaliando outras propriedades e amplificando a correlação de valores obtidos em caldas preparadas num ambiente ideal de laboratório com os de caldas preparadas *in situ*.

Propõem-se assim as seguintes acções para desenvolvimento futuro:

- Avaliar as formulações estudadas na campanha experimental desenvolvida neste trabalho, recorrendo à determinação de outras propriedades das caldas, nomeadamente, a exsudação, a fluidez, a retração e a fluência, e correlacionar quantitativamente os resultados destes ensaios com os das outras propriedades no estado fresco e endurecido
- Estudar outras formulações de calda nomeadamente variando os tipos de cimento e incorporando aditivos.
- Estudar experimentalmente e recorrendo a considerações teóricas a razão pela qual os valores das resistências das caldas são sistematicamente superiores em paralelepípedos do que em cubos,.
- Determinar os valores das resistências das caldas em função do tempo para intervalos temporais de cura mais pequenos, (ao invés de ser só aos 2, 7 e 28 dias). com o intuito de obter a correlação da resistência mecânica com a razão A/C para mais valores de idade e a generalização da Lei de Abrams.
- Amplificar a campanha experimental desenvolvida *in situ*, nomeadamente, com o intuito de aumentar a sensibilidade em relação ao efeito de variações na realização experimental na dispersão dos resultados dos ensaios de resistencia que se

verificam e correlacionar as propriedades de caldas preparadas *in situ* com a das caldas preparadas em laboratório.

- Executar microestacas em meio confinado (no terreno) com caldas preparadas *in situ* e correlacionar os valores da tensão de rotura dessas caldas ao nível do bolbo de selagem de recobrimento das microestacas com a resistência das mesmas caldas em provetes paralelepípedicos e cúbicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NP EN 445:2008 – *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço – Métodos de ensaio*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 2008.
- [2] REBAP – *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*, Porto Editora, Janeiro de 2006.
- [3] ROSQUOET, F.; ALEXIS, A.; KHELIDJ, A.; PHELIPOT A. – *Experimental study of cement grout: rheological behavior and sedimentation*, Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 5, May 2003, Pages 713-722. <http://www.sciencedirect.com> consultado em: 22.08.2010
- [4] NP EN 447:2008 – *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço – Requisitos básicos*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 2008.
- [5] CARVALHO, Mariana – *Ancoragens pré-esforçadas em obras geotécnicas. Construção, ensaios e análise comportamental*, Teses e Programas de Investigação LNEC, ISBN 978-972-49-2184-6, 2009.
- [6] GONÇALVES, João F. C. – *Influência da Esbelteza no Comportamento de Microestacas*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Maio de 2010.
- [7] RODRIGUES, Daniel F. N. – *Jet Grouting – Controlo de Qualidade em terrenos do miocénio de Lisboa*, Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia), 2009.
- [8] MIRANDA, Manuel C.; MARTINS, João G. – *Fundações e Contenção Lateral de Solos – Execução de Estacas*, série Estruturas, 1ª Edição, 2006. <http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Fundacoes/Execucao%20de%20Estacas.pdf> consultado em: 02.09.2010
- [9] COELHO, Silvério – *Tecnologia de Fundações*, Edições E.P.G.E. (Escola Profissional Gustave Eiffel), 1ª Edição, Setembro de 1996.
- [10] CARRETO, Joana Rodrigues – *Jet Grouting. Uma técnica em desenvolvimento*, VII Congresso Nacional Geotecnia, 10 a 13 de Abril de 2000.

- [11] MARTINS, André M. M. – *Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Novembro de 2008.
- [12] MOREIRA, Alberto M. V. T. – *Estudos sobre Caldas de Injecção das Bainhas de Pré-Esforço*, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil.
- [13] MANSUR, A. A. P.; MANSUR, H. S. – *Avaliação do teor de ar incorporado em argamassas modificadas com poli (álcool vinílico)*, 17^a CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. <http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17Cbecimat-210-030.pdf> consultado em: 22.08.2010
- [14] GALVÃO, Jorge M. P. – *Técnicas de ensaio in-situ para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas – Esclerómetro e ultra-sons*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Novembro de 2009.
- [15] RAO, G. Appa – *Generalization of Abram's law for mortars*, Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 3, March 2001, Pages 495-502. <http://www.sciencedirect.com> consultado em: 26.08.2010
- [16] BANU, Zahida; NAGARAJ, T. S. – *Generalization of Abrams' law*, Cement and Concrete Research, Volume 26, Issue 6, June 1996, Pages 933-942. <http://www.sciencedirect.com> consultado em: 23.09.2010
- [17] YEH, I-Cheng – *Generalization of strength versus water-cementitious ratio relationship to age*, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 10, October 2006, Pages 1865-1873. <http://www.sciencedirect.com> consultado em: 21.09.2010
- [18] NP EN 197-1:2001 – *Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 2001
- [19] ERIKSSON, Magnus; FRIEDRICH, Martina; VORSCHULZE, Cristoph – *Variations in the rheology and penetrability of cement-based grouts – an experimental study*, Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 7, July 2004, Pages 1111-1119. <http://www.sciencedirect.com> consultado em: 25.08.2010

- [20] BRAS, Ana; HENRIQUES, Fernando M. A. – *The Influence of the mixing procedures on the optimization of fresh grout procedures*, Materials and Structures, 2009, Volume 42, Number 10, Pages 1423-1432. DOI: 10.1617/s11527-008-9461-z consultado em: 23.08.2010
- [21] COUTINHO, Joana – *Materiais de Construção 2 – 1ª Parte – Ligantes e Caldas* 2002, actualização 2006, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [22] TARYAL, M. Said; CHOWDHURY, M. K. – *Evaluation of the relation between the compressive strength of cement by the British Standard cube test and iso-rilem prism test*, Cement and Concrete Research, Volume 16, Issue 5, September 1986, Pages 633-645. <http://www.sciencedirect.com> consultado em: 08.09.2010
- [23] NP EN 196-1:2006 – *Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 2006.
- [24] DIN 18555-2:1982 – *Testing Of Mortars Containing Mineral Bondery – Freshly Mixed Mortars Containing Aggregates Of Dense Structure (heavy Aggregates) – Determination Of Consistence, Bulk Density And Air Content*.
- [25] NP EN 196-3:2006 – *Métodos de ensaio de cimentos – Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 2006.
- [26] E ISO/DIS 8047 (1982-12): Concrete, hardened; determination of ultrasonic pulse velocity.
- [27] TAYLOR, H. F. W. – *Cement Chemistry*, Thomas Telford Publ., 2ª Ed. (1998) pg. 240
- [28] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. – *Concrete – Microstructure and Properties*, 3ª ed., McGraw-Hill, 2005 pg. 50
- [29] DEMIRBOGA, Ramazan; TURKMEN, Ibrahim; KARACOC, Mehmet B. – *Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixture concrete*, Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 12, December 2004, Pages 2329-2336. <http://www.sciencedirect.com> consultado em: 24.08.2010
- [30] <http://www.portal-srbija.com/gradjevinarstvo/geodezija-geologija/bast-commerce/> consultado em: 01.09.2010

[31] fann[®] - *Model 140, Mud Balance – Instruction Manual.*
<http://www.quincioilfield.com/pdf/6.0%20Other/fannMdl140.pdf> consultado em:
23.08.2010

7. ANEXOS

ANEXO I – FICHA TÉCNICA COM OS VALORES MÉDIOS DOS RESULTADOS DO AUTOCONTROLO PERIÓDICO DAS CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO UTILIZADO NESTE TRABALHO, EFECTUADO PELA SECIL.



RESULTADOS DO AUTOCONTROLO VALORES MÉDIOS

FÁBRICA: SECIL - Outão

BOLETIM Nº 04/10
DATA: 01-07-2010

REFERÊNCIA: CEM II/B-L 32,5 N
Resultados Referentes a Abril/10

ENSAIOS MECÂNICOS [NP EN 196-1]

IDADE	RESISTÊNCIAS (MPa)			
	FLEXÃO		COMPRESSÃO	
	MENSAL	ANUAL	MENSAL	ANUAL
2 dias	4,3	4,1	21,2	19,8
7 dias	5,8	5,7	32,0	31,5
28 dias	6,9	7,0	40,1	40,3

ANÁLISE QUÍMICA

			MENSAL	ANUAL
PERDA AO FOGO	%	P.F.	13,78	14,23
RESÍDUO INSOLÚVEL	%	R.I.	1,63	1,57
ÓXIDO DE SILÍCIO	%	SiO ₂	15,27	15,00
ÓXIDO DE ALUMÍNIO	%	Al ₂ O ₃	3,31	3,15
ÓXIDO DE FERRO	%	Fe ₂ O ₃	2,64	2,69
ÓXIDO DE CÁLCIO	%	CaO	60,04	60,37
ÓXIDO DE MAGNÉSIO	%	MgO	1,30	1,50
SULFATOS	%	SO ₃	2,43	2,44
ÓXIDO DE POTÁSSIO	%	K ₂ O		
ÓXIDO DE SÓDIO	%	Na ₂ O		
CLORETOS	%	Cl	0,05	0,03
CAL LIVRE	%		1,23	1,07
N/D (não Doseados)	%			

ENSAIOS FÍSICOS

		MENSAL	ANUAL
Peso Específico (g/cm ³)			2,98
Resíduo de Peneiração (%)	90 µm		
	63 µm		
	45 µm	7,3	8,6
	32 µm		
Superfície Específica de Blaine (cm ² /g) [NP EN 196-6]		5067	5083
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		26,5	26,4
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	121	125
	Fim	156	157
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		0,6	0,6
Índice de Brancura (0 a 100)			

OBSERVAÇÕES:

ANUAL - Valor médio dos últimos 12 meses.

NOTA: todos os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam a [norma aplicada].

VISTO

APROVADO

**ANEXO II – DETERMINAÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA DA SALA CONDICIONADA UTILIZADA
PARA A CURA DOS PROVETES**

- a) Temperatura seca – 24 °C
- b) Temperatura húmida – 22 °C
- c) Diferença: $T_{seca} - T_{húmida} = 2\text{ °C}$
- d) Cruzando os valores de a) e c) determina-se uma humidade relativa de 83%, como se pode verificar figura seguinte.

CELSIUS SCALE

Dry Bulb °C	DEPRESSION OF WET BULB °C													
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
-1	90	79	69	59	49	39	30	20	10	1				
0	90	81	71	61	52	44	34	25	16	7				
+1	90	81	73	64	55	47	38	29	20	13	4			
2	91	82	73	64	57	49	41	33	24	17	9	1		
3	91	83	74	65	57	49	43	36	28	21	14	7		
4	92	83	75	67	59	51	43	35	32	25	18	11	4	
5	92	84	76	68	61	53	46	38	31	24	21	15	8	2
6	92	85	77	70	62	55	48	41	34	27	20	14	12	6
7	93	85	78	71	64	57	50	44	37	30	24	17	11	5
8	93	86	79	72	65	59	52	46	39	33	27	21	15	9
9	93	86	80	73	67	60	54	48	42	36	30	24	18	12
10	93	87	81	74	68	62	56	50	44	38	33	27	21	16
11	94	87	81	75	69	63	58	52	46	41	35	30	24	19
12	94	88	82	76	70	65	59	54	48	43	37	32	27	22
13	94	88	83	77	71	66	60	55	50	45	40	35	30	25
14	94	89	83	78	72	67	62	57	52	47	42	37	32	27
15	94	89	84	78	73	68	63	58	53	48	42	39	34	30
16	95	89	84	79	74	69	64	59	55	50	43	41	37	32
17	95	90	85	80	75	70	65	61	56	52	47	43	39	34
18	95	90	85	80	76	71	66	62	57	53	49	45	40	36
19	95	90	86	81	76	72	67	63	59	54	50	46	42	38
20	95	91	86	81	77	73	68	64	60	56	52	48	44	40
21	95	91	86	82	78	73	69	65	61	57	53	49	45	42
22	95	91	87	82	78	74	70	66	62	58	54	50	47	43
23	96	91	87	83	79	75	71	67	63	59	55	52	48	45
24	96	91	87	83	79	75	71	68	64	60	57	53	49	46
25	96	92	88	84	80	76	72	68	65	61	58	54	51	47
26	96	92	88	84	80	76	73	69	66	62	59	55	52	49
27	96	92	88	84	81	77	73	70	66	63	59	56	53	50
28	96	92	88	85	81	77	74	70	67	64	60	57	54	51
29	96	92	89	85	81	78	74	71	68	64	61	58	55	52
30	96	93	89	85	82	78	75	72	68	65	62	59	56	53
32	96	93	89	86	82	79	76	73	70	67	64	61	58	55
34	96	93	89	86	83	80	77	74	71	68	65	62	59	56
36	96	93	90	87	84	81	78	75	72	69	66	63	61	58
38	96	94	90	87	84	81	78	75	73	70	67	64	62	59
40	96	94	91	88	85	82	79	76	74	71	69	66	63	61
42	97	94	91	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62
44	97	94	91	88	86	83	81	78	75	72	70	67	65	63
46	97	94	91	89	86	83	81	78	76	73	71	68	66	64
48	97	95	92	89	86	83	81	78	76	74	72	69	67	65
50	97	95	92	89	87	84	82	79	77	74	72	70	68	65
52	97	95	92	89	87	84	82	79	77	75	73	70	68	66
54	97	95	93	90	87	85	83	80	78	75	73	71	69	67
56	97	95	93	90	87	85	83	80	78	76	74	71	69	67

Figura II.1 – Tabela para determinação da humidade relativa da sala de cura [adaptado 31].

ANEXO III – QUANTIDADES DE MATERIAL UTILIZADOS NAS CALDAS DE CIMENTO PREPARADAS EM LABORATÓRIO.

Tabela III.1 – Quantidades de material utilizados nas caldas de cimento preparadas em laboratório.

Calda de cimento	Misturador		Quantidades de material (Kg)	
	Pás	Hélice	Cimento	Água
LAB0.4		x	17,500	7,000
LAB0.5	x		2,500	1,250
		x	14,000	7,000
LAB0.6		x	11,667	7,000
LAB0.7		x	12,143	8,500
LAB0.8		x	11,250	9,000
LAB0.9		x	11,111	10,000
LAB1.0		x	10,000	10,000

ANEXO IV – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS EFECTUADOS NAS CALDAS DE CIMENTO PREPARADAS NO LABORATÓRIO.

Tabela I – Correspondência entre a denominação atribuída às caldas produzidas em Laboratório e o protocolo experimental adoptado, bem como os resultados experimentais obtidos.

Calda de cimento	Equipamento de Mistura				Sequência de entrada dos constituintes				Ensaio estado fresco				Ensaio estado endurecido												
									Massa Volúmica [g/cm ³]	Teor em Ar [%]	Tempo de Presa [h:m]		Resistência Mecânica [MPa]						Veloc. prop. ondas ultra-sónicas [m/s]						
											Início	Fim	Cubos			Paralelepípedos			Cubos			Paralelepípedos			
													2 dias	7 dias	28 dias	2 dias	7 dias	28 dias	2 dias	7 dias	28 dias	2 dias	7 dias	28 dias	
LAB0.4 - 1	▪	▪	▪	▪	1,93	1,1			26,5	36,3	47,9	5,6	30,1	8,2	40,3	10,2	50,1	3030	3220	-	3070	3350	-		
LAB0.4 - 2	▪	▪	▪	▪	1,91	1,2			23,9	32,8	49,1	6,3	31,1	9,1	42,8	10,9	55,1	3020	3250	-	3080	3350	-		
LAB0.4 - 3	▪	▪	▪	▪	1,91	1,5			25,6	34,9	47,2	6,2	30,1	9,6	42,1	10,9	54,7	3030	3240	-	3050	3360	-		
LAB0.4 - 4	▪	▪	▪	▪	1,93	1,1	3:41	4:41	26,4	34,0	49,7	6,3	30,0	6,7	42,0	10,9	52,3	3050	3200	-	2970	3380	-		
LAB0.4 - 5	▪	▪	▪	▪	1,92	1,2	2:33	3:18	26,1	32,0	50,9	6,6	26,4	7,3	38,0	8,4	51,3	2950	3210	-	3070	3350	-		
LAB0.4 - 6	▪	▪	▪	▪	1,92	1,2			27,9	32,7	48,2	6,3	28,4	9,5	42,5	8,3	52,8	3050	3210	-	3060	3340	-		
LAB0.5 - 1	▪	▪	▪	▪	1,77	1,3			-	-	-	3,3	15,6	5,2	25,2	8,2	33,0	-	-	-	-	2970	3160		
LAB0.5 - 2	▪	▪	▪	▪	1,77	1,3			-	-	-	3,3	15,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
LAB0.5 - 3	▪	▪	▪	▪	1,81	1,4			-	-	-	3,7	16,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
LAB0.5 - 4	▪	▪	▪	▪	1,83	1,6	3:58	5:23	-	-	-	3,7	16,0	5,7	25,8	9,1	35,1	-	-	-	-	-	3020	3160	
LAB0.5 - 5	▪	▪	▪	▪	1,78	1,4	3:42	4:57	-	-	-	3,9	16,7	5,4	24,9	8,6	34,7	-	-	-	-	-	2710	3000	3160
LAB0.5 - 6	▪	▪	▪	▪	1,79	1,4			-	-	-	3,2	16,4	6,4	24,8	8,2	34,6	-	-	-	-	-	2720	3000	3120
LAB0.5 - 7	▪	▪	▪	▪	-	-			16,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 8	▪	▪	▪	▪	-	-			14,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 9	▪	▪	▪	▪	-	-			14,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 10	▪	▪	▪	▪	-	-			16,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 11	▪	▪	▪	▪	-	-			-	-	21,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 12	▪	▪	▪	▪	-	-			-	-	22,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 13	▪	▪	▪	▪	-	-			-	-	21,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 14	▪	▪	▪	▪	-	-			-	-	22,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 15	▪	▪	▪	▪	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 16	▪	▪	▪	▪	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 17	▪	▪	▪	▪	-	-			-	-	31,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LAB0.5 - 18	▪	▪	▪	▪	1,78	1,2			16,7	21,9	33,4	3,8	15,6	6,4	24,4	8,7	30,0	2760	2930	3060	2720	2990	3160		
LAB0.5 - 19	▪	▪	▪	▪	1,80	1,5	4:10	5:25	16,9	20,7	32,9	3,5	15,9	6,2	24,1	9,0	30,9	2760	2950	3070	2730	3030	3120		
LAB0.5 - 20	▪	▪	▪	▪	1,79	1,3	4:10	5:15	14,9	21,6	32,1	3,4	15,6	6,2	25,3	8,7	33,0	2700	2960	3050	2700	3030	3150		
LAB0.5 - 21	▪	▪	▪	▪	1,80	1,5			14,7	21,3	32,3	4,5	15,2	6,1	25,1	8,0	34,0	2700	2940	3030	2700	2970	3160		
LAB0.5 - 22	▪	▪	▪	▪	1,81	1,6			16,0	21,6	30,8	3,8	16,7	6,6	25,8	8,8	36,0	2730	2940	3060	2730	3010	3140		
LAB0.5 - 23	▪	▪	▪	▪	1,80	1,2			15,4	21,0	31,0	3,5	16,5	6,4	25,0	8,3	34,1	2680	2920	3060	2690	2970	3160		
LAB0.6 - 1	▪	▪	▪	▪	1,70	1,9	4:45	5:55	9,4	15,0	21,5	2,6	12,0	4,3	18,8	5,8	26,1	2500	2650	-	2500	2810	-		
LAB0.6 - 2	▪	▪	▪	▪	1,70	1,6	4:01	5:21	10,3	14,5	21,9	3,1	11,0	4,3	17,9	6,8	24,8	2470	2670	-	2500	2790	-		
LAB0.6 - 3	▪	▪	▪	▪	1,70	1,1			10,4	16,3	21,4	1,5	10,3	4,0	17,0	6,1	22,4	2460	2700	-	2510	2760	-		
LAB0.6 - 4	▪	▪	▪	▪	1,71	1,6			9,9	15,6	22,1	2,4	10,5	3,8	16,6	5,7	22,2	2450	2720	-	2510	2770	-		
LAB0.6 - 5	▪	▪	▪	▪	1,70	1,5			10,5	16,5	20,9	2,7	9,8	5,4	15,7	6,3	22,2	2440	2650	-	2510	2780	-		
LAB0.6 - 6	▪	▪	▪	▪	1,70	1,4			9,8	16,5	21,8	2,9	10,3	4,5	16,3	7,2	22,6	2490	2710	-	2490	2760	-		
LAB0.7 - 1	▪	▪	▪	▪	1,63	1,4			7,1	11,8	17,5	1,8	7,9	3,6	12,4	6,2	18,4	2370	2550	-	2410	2690	-		
LAB0.7 - 2	▪	▪	▪	▪	1,63	1,8			6,8	11,7	17,4	2,2	8,5	3,7	14,3	6,1	20,7	2370	2530	-	2360	2640	-		
LAB0.7 - 3	▪	▪	▪	▪	1,62	1,9			6,7	12,0	17,0	2,2	9,3	3,6	13,5	6,0	21,6	2340	2570	-	2400	2700	-		
LAB0.7 - 4	▪	▪	▪	▪	1,63	1,9	4:59	6:19	6,5	11,6	16,6	2,0	8,4	3,7	13,1	5,9	18,9	2350	2550	-	2460	2690	-		
LAB0.7 - 5	▪	▪	▪	▪	1,63	2,1	4:48	6:08	7,0	11,8	17,2	2,0	7,1	4,3	11,3	5,5	17,2	2390	2460	-	2350	2530	-		
LAB0.7 - 6	▪	▪	▪	▪	1,64	1,5			6,6	11,6	16,4	1,8	8,6	3,6	13,1	5,6	20,6	2300	2510	-	2330	2590	-		
LAB0.8 - 1	▪	▪	▪	▪	1,57	1,5			3,7	9,5	13,6	1,2	5,2	2,9	6,9	5,0	14,9	2220	2420	-	2280	2440	-		
LAB0.8 - 2	▪	▪	▪	▪	1,57	2,0			4,7	9,0	15,0	2,1	6,7	3,2	13,8	6,1	18,0	2220	2450	-	2310	2450	-		
LAB0.8 - 3	▪	▪	▪	▪	1,60	1,4			4,3	9,2	14,5	1,4	6,6	3,3	11,5	5,6	16,6	2330	2480	-	2320	2550	-		
LAB0.8 - 4	▪	▪	▪	▪	1,58	1,8			5,4	9,6	14,0	2,1	7,7	2,9	12,0	5,6	18,1	2280	2470	-	2360	2620	-		
LAB0.8 - 5	▪	▪	▪	▪	1,58	2,0	5:03	7:13	4,7	9,7	13,4	2,3	7,2	3,0	12,5	5,8	17,3	2310	2430	-	2370	2610	-		
LAB0.8 - 6	▪	▪	▪	▪	1,57	2,1	4:45	7:00	4,1	9,4	13,7	2,1	7,0	3,7	12,0	5,0	16,6	2290	2450	-	2380	2640	-		
LAB0.9 - 1	▪	▪	▪	▪	1,54	1,8			4,3	7,6	12,1	0,2	2,9	1,8	6,8	2,7	9,4	2240	2400	-	2250	2480	-		
LAB0.9 - 2	▪	▪	▪	▪	1,53	2,1	5:29	7:34	4,3	7,6	13,6	1,7	5,2	2,7	9,3	3,6	14,3	2250	2430	-	2240	2440	-		
LAB0.9 - 3	▪	▪	▪	▪	1,53	1,6	4:59	7:19	4,3	8,1	11,4	1,6	5,0	2,8	8,5	3,5	11,5	2130	2370	-	2200	2470	-		
LAB0.9 - 4	▪	▪	▪	▪	1,56	2,0			4,5	8,4	12,8	1,0	5,3	2,3	8,8	4,1	11,7	2170	2380	-	2200	2480	-		
LAB0.9 - 5	▪	▪	▪	▪	1,53	2,0			4,2	7,9	12,0	1,0	5,3	2,1	8,6	4,4	11,7	2170	2360	-	2240	2490	-		
LAB0.9 - 6	▪	▪	▪	▪	1,53	1,6			4,2	8,8	13,1	1,9	5,5	2,4	9,4	4,5	13,8	2270	2380	-	2180	2480	-		
LAB1.0 - 1	▪	▪	▪	▪	1,49	1,9			3,7	6,2	12,3	0,7	5,3	2,2	9,0	3,8	13,7	2130	2390	-	2260	2390	-		
LAB1.0 - 2	▪	▪	▪	▪	1,49	1,9			4,1	6,4	10,9	0,2	2,9	1,4	6,8	2,7	8,0	2130	2380	-	2200	2370	-		
LAB1.0 - 3	▪	▪	▪	▪	1,49	2,0	5:42	7:36	3,9	8,6	12,6	1,7	4,3	2,3	8,3	3,8	12,1	2160	2340	-	2170	2440	-		
LAB1.0 - 4	▪	▪	▪	▪</																					

Tabela II – Valores médios obtidos nos ensaios efectuados em todas as caldas de cimento preparadas no Laboratório, e respectivos desvios padrão.

Calda	Ensaio estado fresco								Ensaio estado endurecido																													
	Massa Volúmica [g/cm ³]	DP	Teor em Ar [%]	DP	Tempo de Presa [h:m]				Resistência Mecânica [MPa]												Velocidade propagação ondas ultra-sónicas [m/s]																	
									Cubos				Paralelepípedos								Cubos				Paralelepípedos													
					2 dias	DP	7 dias	DP	28 dias	DP	2 dias			7 dias			28 dias		2 dias	DP	7 dias	DP	28 dias	DP	2 dias	DP	7 dias	DP	28 dias	DP								
Início	DP	Fim	DP	Flexão	DP	Comp.	DP	Flexão	DP	Comp.	DP	Flexão	DP	Comp.	DP	2 dias	DP	7 dias	DP	28 dias	DP	2 dias	DP	7 dias	DP	28 dias	DP											
LAB0.4	1,92	0,01	1,22	0,15	3:07	0:48	3:59	0:58	26,0	1,3	33,8	1,6	48,8	1,3	6,2	0,3	29,4	1,7	8,4	1,2	41,3	1,8	9,9	1,2	52,7	1,9	3022	37	3222	19	-	-	3050	40	3355	14	-	-
LAB0.5	1,79	0,02	1,39	0,14	4:00	0:13	5:15	0:12	15,7	0,9	21,7	0,6	32,0	0,9	3,6	0,3	16,1	0,5	6,1	0,5	25,0	0,6	8,6	0,4	33,5	1,9	2721	26	2942	18	3056	11	2713	15	2999	24	3149	17
LAB0.6	1,70	0,00	1,52	0,26	4:23	0:31	5:38	0:24	10,0	0,4	15,7	0,8	21,6	0,5	2,5	0,6	10,7	0,8	4,4	0,6	17,0	1,1	6,3	0,6	23,4	1,7	2468	23	2683	31	-	-	2503	8	2778	19	-	-
LAB0.7	1,63	0,01	1,77	0,27	4:53	0:07	6:13	0:07	6,8	0,2	11,7	0,2	17,0	0,4	2,0	0,2	8,3	0,8	3,8	0,3	13,0	1,0	5,9	0,3	19,6	1,6	2353	31	2528	39	-	-	2385	48	2640	68	-	-
LAB0.8	1,58	0,01	1,80	0,29	4:54	0:12	7:06	0:09	4,5	0,6	9,4	0,3	14,0	0,6	1,9	0,4	6,7	0,9	3,2	0,3	11,4	2,4	5,5	0,4	16,9	1,2	2275	46	2450	23	-	-	2337	39	2552	88	-	-
LAB0.9	1,54	0,01	1,85	0,22	5:14	0:21	7:26	0:10	4,3	0,1	8,1	0,5	12,5	0,8	1,2	0,6	4,9	1,0	2,4	0,4	8,6	0,9	3,8	0,7	12,1	1,8	2205	56	2387	25	-	-	2218	29	2473	18	-	-
LAB1.0	1,49	0,00	1,85	0,16	5:37	0:06	7:34	0:02	4,0	0,2	7,2	1,0	11,8	0,6	1,1	0,7	4,1	0,8	2,0	0,3	7,9	0,7	3,8	0,8	11,9	2,2	2160	27	2358	26	-	-	2182	45	2408	48	-	-

DP – Desvio Padrão

ANEXO V – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CALDAS DE CIMENTO DE RAZÃO A/C DE 0,7 COM 2 DIAS DE IDADE, CURADAS EM PROVETES CÚBICOS E DETERMINADOS EM EQUIPAMENTOS DE ENSAIO DIFERENTES.

Tabela I – Correspondência dos resultados da resistência à compressão de caldas de cimento de razão A/C de 0,7 com 2 dias de idade, curadas em provetes cúbicos, com os equipamentos de ensaio onde foram determinados.

Calda de cimento	Equipamento ensaio utilizado	Resistência compressão [MPa]	Média ± DP
		Cubos - 2 dias	
LAB0.7 - 1	Prensa ISEL	7,1	6,8 ± 0,2
LAB0.7 - 2	Prensa ISEL	6,8	
LAB0.7 - 3	Prensa IST	6,7	
LAB0.7 - 4	Prensa IST	6,5	
LAB0.7 - 5	Prensa LNEC	7,0	
LAB0.7 - 6	Prensa LNEC	6,6	

ANEXO VI – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DAS CALDAS PREPARADAS *IN SITU*, NA OBRA.

Tabela I – Resultados das resistências mecânicas das caldas preparadas *in situ* (Obra) em provetes cúbicos e paralelepípedos.

Calda	Resistência Mecânica [MPa]					
	Cubos			Paralelepípedos		
	2 dias	7 dias	28 dias	2 dias	7 dias	28 dias
OB1	15,2	20,5	-	-	-	-
OB2	14,1	18,9	21,8	15,7	23,1	27,1
OB3	13,3	18,5	21,4	15,0	24,1	31,6
OB4	15,3	19,6	24,0	18,1	27,7	33,8
OB5	15,4	19,4	23,9	17,7	28,7	33,9
OB6	12,3	17,3	21,2	13,8	19,9	24,1
OB7	13,9	16,7	21,0	13,0	19,0	22,9
OB8	14,2	17,4	22,3	9,2	15,7	24,5
OB9	13,6	17,7	20,0	12,9	15,1	24,3
Média	14,1	18,4	21,9	14,4	21,7	27,7