



**TECNOLOGIA
BARREIRO**

ESCOLA SUPERIOR
POLITÉCNICO SETÚBAL

IVO JORGE
MAGALHÃES DA
COSTA

**ARGAMASSAS ATIVADAS
ALCALINAMENTE COM
BORRACHA DE PNEUS USADOS**

Relatório de Dissertação do Mestrado em
Engenharia Civil

ORIENTADORES

Professor Doutor António Pedro Carones Duarte

Professor Doutor Miguel Nuno Caneiras Bravo

Dezembro de 2024

IVO JORGE
MAGALHÃES DA
COSTA

**ARGAMASSAS ATIVADAS
ALCALINAMENTE COM
BORRACHA DE PNEUS USADOS**

JÚRI

Presidente: Doutor Rui Duarte Neves,
Professor Coordenador, ESTBarreiro/IPS

Orientador: Doutor António Pedro Carones Duarte,
Professor Adjunto Convidado, ESTBarreiro/IPS

Vogal: Doutor João Nuno Noronha Ramos Vigário Pacheco,
Investigador, C5Lab

Dezembro de 2024

ARGAMASSAS ATIVADAS ALCALINAMENTE COM BORRACHA DE PNEUS USADOS

Declaração de autoria da obra

Declaro ser o autor desta obra, que é original e inédita. Os autores e obras consultados são devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluídas.

Assinado por: **Ivo Jorge Magalhães da Costa**
Num. de Identificação: 11209280
Data: 2024.11.14 21:36:00+00'00'

(Ivo Jorge Magalhães da Costa)

©2024, IVO JORGE MAGALHÃES DA COSTA

O Instituto Politécnico de Setúbal reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste documento representa o fim de uma etapa da minha vida que contou com dois anos de investimento pessoal e académico, tendo exigido superação a vários níveis que só foi possível concluir com o apoio de várias pessoas que acompanharam o meu percurso.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor António Duarte e Professor Doutor Miguel Bravo, não só por terem aceite a orientação deste trabalho e definido o plano inicial da dissertação, como também por toda a disponibilidade no fornecimento dos materiais necessários à investigação, na transmissão dos conhecimentos científicos, na demonstração das várias técnicas laboratoriais e no apoio prestado na revisão do trabalho.

À Direção da ESTBarreiro em geral, e à Professor Doutora Cristiana Pereira em particular, pela disponibilização de materiais e equipamentos do laboratório de Engenharia Civil da ESTBarreiro para a realização da campanha experimental, mesmo que fora de horas de funcionamento.

Ao Professor Doutor Rui Neves por todo o acompanhamento e apoio prestados ao nível da coordenação do Mestrado em Engenharia Civil e pela disponibilização de cinzas volantes que permitiu a realização da campanha experimental sem atraso.

Ao assistente do laboratório de Engenharia Civil da ESTBarreiro, Sr. Alexandre Gamito, por toda a disponibilidade e colaboração prestadas ao longo da execução da campanha experimental, especialmente ao nível da produção das argamassas e na realização de todos os ensaios no laboratório.

À Presidência do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa pela disponibilização do acesso ao laboratório e utilização de equipamentos para realização do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.

A todos os colegas que conheci ao longo do meu percurso no Mestrado e que participaram na realização das atividades académicas em grupo. Em especial, ao Carlos Conceição, ao Wellington Silva, ao André Marques e ao Demétrio Gonçalves, com quem passei momentos muito enriquecedores.

Por fim, agradeço à minha família pelo apoio prestado que proporcionou a estabilidade necessária para a frequência académica nesta fase da vida.

RESUMO

A indústria da construção comporta problemas ambientais crescentes, devido à excessiva utilização de materiais naturais e às elevadas emissões de carbono para a atmosfera. Estas preocupações motivam a elaboração desta dissertação com vista ao estudo de argamassas sustentáveis baseadas na utilização de precursor substituto do cimento Portland e na incorporação de borracha de pneus usados substituindo o agregado fino.

Na investigação, são produzidas argamassas de cimento e, em alternativa, são produzidas argamassas à base de cinzas volantes ativadas alcalinamente com solução combinada de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Assim, são investigadas experimentalmente as propriedades de 14 tipos de argamassas, aos 28 e 56 dias, com um total de 84 provetes, desde argamassas de controlo/referência até argamassas incorporando borracha de pneus usados para substituir 5%, 10% e 20% (em volume) do agregado fino. Estuda-se também a utilização de um método de tratamento da borracha com hidróxido de sódio (NaOH) com o objetivo de melhorar a aderência entre a borracha e a matriz do precursor e assim atingir melhor desempenho.

A campanha experimental inclui duas fases: na primeira fase, são caracterizados os materiais e determina-se a relação água/precursor das argamassas; na segunda fase, investigam-se as propriedades físicas e mecânicas das argamassas. Os ensaios laboratoriais realizados são os convencionais, sem especificidades associadas a aplicações particulares das argamassas (por exemplo, assentamento, revestimento, etc.).

Entre os vários objetivos da dissertação estão a avaliação da influência do teor de borracha e do tratamento da borracha com hidróxido de sódio, no desempenho das argamassas.

A investigação permite concluir, entre outros aspetos, que as argamassas de cinzas volantes podem constituir uma alternativa sustentável à utilização do cimento Portland tendo em consideração os melhores resultados ao nível da resistência e de outras propriedades. Por outro lado, o tratamento da borracha em solução saturada de NaOH durante 30 minutos revelou-se inviável porque conduz a uma redução do desempenho nas propriedades mecânicas, apesar dos resultados promissores descritos na literatura.

Palavras Chave: Argamassa de cimento, Argamassa de cinza volante, Ativação alcalina, Borracha de pneus usados, Sustentabilidade.

ABSTRACT

The construction industry has growing environmental problems, due to the excessive use of natural materials and high carbon emissions into the atmosphere. These concerns motivate the elaboration of this dissertation with a view to the study of sustainable mortars based on the use of a substitute precursor for Portland cement and the incorporation of rubber from used tires replacing the fine aggregate.

In research, cement mortars are produced and, alternatively, alkaline activated fly ash based mortars are produced with a combined solution of sodium hydroxide and sodium silicate. Thus, the properties of 14 types of mortars are experimentally investigated, at 28 and 56 days, with a total of 84 specimens, from control/reference mortars to mortars incorporating rubber from used tires to replace 5%, 10% and 20% (by volume) of the fine aggregate. Additionally, the use of a rubber treatment method with sodium hydroxide to improve the adhesion between the rubber particles and the precursor matrix is studied aiming at achieving greater performance.

The experimental campaign includes two phases: in the first phase, the materials are characterized and the water/precursor ratio of the mortars is determined; In the second phase, the physical and mechanical properties of the mortars are investigated. The laboratory tests carried out are conventional, without specificities associated with particular applications of mortars (e.g. laying, coating, etc.).

Among the various objectives of the dissertation are the evaluation of the influence of rubber content and rubber treatment with sodium hydroxide on the performance of mortars.

The research allows us to conclude, among other aspects, that fly ash mortars can constitute a sustainable alternative to the use of Portland cement, taking into account the best results in terms of strength and other properties. On the other hand, the treatment of rubber in saturated solution of NaOH for 30 minutes proved to be unfeasible because it leads to a reduction in performance in mechanical properties, despite the promising results described in the literature.

Keywords: Cement mortar, Fly ash mortar, Alkaline activation, Rubber from used tires, Sustainability.

ÍNDICE

1 Introdução	1
1.1 Contexto e motivação	2
1.2 Objetivos da dissertação	4
1.3 Estrutura e organização do documento	5
2 Estado da Arte.....	7
2.1 Reações de hidratação do cimento.....	7
2.2 Reações de polimerização de ligantes ativados alcalinamente.....	10
2.3 Argamassas e betões com agregados de borracha	16
2.4 Argamassas e betões com ligantes ativados alcalinamente	29
3 Campanha Experimental	39
3.1 Plano experimental	39
3.2 Constituintes das argamassas.....	40
3.2.1 Água.....	40
3.2.2 Ativadores alcalinos.....	41
3.2.3 Agregados naturais	43
3.2.4 Agregados reciclados de borracha	43
3.2.5 Cimento.....	45
3.2.6 Cinzas volantes	46
3.2.7 Adjuvantes	47
3.3 Identificação das argamassas	47
3.4 Composição das argamassas.....	48
3.4.1 Argamassas de cimento	50
3.4.2 Argamassas ativadas alcalinamente.....	54
3.5 Produção das argamassas.....	56
3.5.1 Argamassas de referência	56
3.5.2 Argamassas com borracha de pneus usados	57
3.6 Preparação dos provetes	57

3.7	Condições de cura	58
3.8	Caracterização dos materiais.....	59
3.8.1	Baridade	59
3.8.2	Distribuição granulométrica.....	61
3.8.3	Massa volúmica e absorção de água	62
3.9	Caracterização das argamassas no estado fresco	65
3.9.1	Consistência por espalhamento	65
3.9.2	Massa volúmica.....	67
3.10	Caracterização das argamassas no estado endurecido	68
3.10.1	Resistência à tração (por flexão) e à compressão	68
3.10.2	Módulo de elasticidade dinâmico	70
3.10.3	Absorção de água por imersão	73
3.10.4	Porosidade aberta e massa volúmica.....	74
3.10.5	Absorção de água por capilaridade	76
3.10.6	Velocidade de propagação de ultrassons	78
4	Apresentação e discussão dos resultados	81
4.1	Propriedades dos materiais e relações água/precursor	81
4.1.1	Distribuição granulométrica.....	81
4.1.2	Baridade	83
4.1.3	Massa volúmica e absorção de água	83
4.1.4	Relações água/precursor	84
4.2	Caracterização preliminar das argamassas.....	85
4.2.1	Consistências por espalhamento	85
4.2.2	Massa volúmica das argamassas no estado fresco	86
4.3	Caracterização mecânica e física das argamassas	88
4.3.1	Resistências à tração (por flexão) e à compressão	88
4.3.2	Módulo de elasticidade dinâmico	92
4.3.3	Porosidade aberta e massa volúmica.....	94
4.3.4	Absorção de água por imersão	97
4.3.5	Absorção de água por capilaridade	99
4.3.6	Velocidade de propagação de ultrassons	102
5	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	105
5.1	Análise do trabalho realizado.....	106

5.2	Trabalhos futuros	109
Referências		111
Apêndices.....		117
A	Resumo dos resultados dos ensaios	119
B	Resultados da caracterização mecânica das argamassas	125
B.1	Resultados do ensaio de resistência à compressão	125
B.2	Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão	126
B.3	Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico	127
C	Resultados da caracterização física das argamassas	131
C.1	Resultados do ensaio de absorção de água por imersão	131
C.2	Resultados do ensaio de porosidade aberta	132
C.3	Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade	134
C.4	Resultado do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons	145
Anexos.....		147
A	Deliberação 23/123 da ESTBarreiro	149
B	Declaração de Desempenho 0856-CPR-0402	151
C	Ficha Técnica de Produto (Areia 0/2)	153
D	Ficha Técnica de Produto (Areia 0/4)	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produtos de hidratação do cimento Portland, adaptado de Gomes <i>et al.</i> (2013).	10
Figura 2 - Modelo da estrutura do gel C-A-S-H (Fernández-Jimenez, 2000).	11
Figura 3 - Quebra de ligações covalentes no precursor (Krivenko, 2017).	14
Figura 4 - Modelo da estrutura do gel N-A-S-H (Palomo <i>et al.</i> , 2005).	15
Figura 5 - Estrutura de um pneu (Souza, 2019).	17
Figura 6 - Extensão do betão normal e com borracha quando sujeitos à flexão, adaptado de Li <i>et al.</i> (1998).	19
Figura 7 - Resistência à compressão da argamassa aos 7 e 28 dias com variação do período de tratamento da borracha, adaptado de Youssf <i>et al.</i> (2016).	21
Figura 8 - Modo de rotura da argamassa geopolimérica aos 28 dias, adaptado de Abd-Elaty <i>et al.</i> (2022).	24
Figura 9 - Efeito do teor de agregados de borracha na porosidade aparente aos 28 dias, adaptado de Uygunoğlu e Topçu (2010).	26
Figura 10 - Absorção de água por capilaridade às 72 horas, em g/mm ² , para os diversos betões, adaptado de Bravo e de Brito (2012).	27
Figura 11 - Massa volúmica aos 28 e aos 90 dias para diferentes tipos de argamassas, adaptado de Pedro (2011).	28
Figura 12 - Média da velocidade de ultrassons em provetes de argamassas de cimento com substituição de areia por borracha, adaptado de Souza (2019).	29
Figura 13 - Efeito do teor de borracha na velocidade de propagação de ultrassom, adaptado de Najim e Hall (2010).	29
Figura 14 - Partículas de cinza volante ampliadas 5500x (Coutinho, 2006).	30
Figura 15 - Modelo da formação do gel N-A-S-H, adaptado de Krivenko (2017).	32
Figura 16 - Modelo concetual da ativação de aluminossilicato com hidróxido, adaptado de Provis e Deventer (2014).	32
Figura 17 - Ação do ativador alcalino nas cinzas volantes, adaptado de Fernández-Jiménez <i>et al.</i> , (2005).	33
Figura 18 - Microestrutura da ativação alcalina de cinzas volantes (Fernandez-Jimenez <i>et al.</i> , 2005).	33
Figura 19 - Ativadores alcalinos utilizados na campanha experimental.	42
Figura 20 - Amostras de areia fina (direita) e areia grossa (esquerda).	43
Figura 21 - Três amostras de borracha: 0-1 mm (esquerda), 1-2 mm (centro) e 2-4 mm (direita).	44

Figura 22 - Procedimentos do tratamento da borracha em solução de NaOH.....	45
Figura 23 - Embalagem e valores da resistência à compressão do betão com cimento CEM II/B-L 32,5 N.	46
Figura 24 - Amostra de cinzas volantes.....	46
Figura 25 - Superplastificante SikaPlast-717 utilizado na produção das argamassas.	47
Figura 26 - Curvas de referência de Faury para as argamassas de cimento.	49
Figura 27 - Comparação da Curva de Faury sem cimento e as curvas da distribuição dos agregados em ARC.	50
Figura 28 - Equipamento e materiais utilizados na produção de argamassas.....	57
Figura 29 - Equipamento utilizado na preparação de provetes.....	58
Figura 30 - Condições de cura dos provetes e identificação.....	59
Figura 31 - Equipamento utilizado no ensaio da baridade.....	60
Figura 32 - Equipamento do ensaio de distribuição granulométrica.	62
Figura 33 - Equipamento do ensaio de absorção de água e massa volúmica.	65
Figura 34 - Equipamento do ensaio e espalhamento de amostra de argamassa.....	66
Figura 35 - Equipamento do ensaio da massa volúmica.....	68
Figura 36 - Equipamento e rotura do provete no ensaio de tração por flexão.	69
Figura 37 - Equipamento do ensaio e forma de rotura à compressão do provete.	70
Figura 38 - Equipamento do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.	71
Figura 39 - Equipamento do ensaio de absorção de água por imersão.....	74
Figura 40 - Equipamento do ensaio de porosidade aberta e massa volúmica.....	75
Figura 41 - Equipamento do ensaio de capilaridade.....	77
Figura 42 - Declive da linha de tendência no domínio linear da curva de ARAA aos 56 dias.	78
Figura 43 - Equipamento do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons.	79
Figura 44 - Curvas granulométricas dos agregados.....	82
Figura 45 - Gráfico dos resultados da consistência por espalhamento das argamassas.....	86
Figura 46 - Gráfico da variação das massas volúmicas das argamassas.....	87
Figura 47 - Gráfico dos resultados da resistência à tração por flexão.	89
Figura 48 - Gráfico dos resultados da resistência à compressão.	91
Figura 49 - Gráfico dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico.	93
Figura 50 - Gráfico dos resultados da porosidade aberta.....	95
Figura 51 - Gráfico dos resultados da massa volúmica no estado endurecido.	97
Figura 52 - Gráfico dos resultados do ensaio de AAI.....	98
Figura 53 - Gráfico dos resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade.	100

Figura 54 - Gráfico dos resultados do valor assintótico de absorção de água por capilaridade.....	102
Figura 55 - Gráfico dos resultados do ensaio VPU.....	103

APÊNDICES

Figura AP 1 - Determinação gráfica do coeficiente de capilaridade de várias argamassas.	141
Figura AP 2 - Determinação gráfica do coeficiente de capilaridade de várias argamassas.	142
Figura AP 3 - Determinação gráfica do coeficiente de capilaridade de várias argamassas.	143
Figura AP 4 - Determinação gráfica do coeficiente de capilaridade de várias argamassas.	144

ANEXOS

Figura AN 1 - Deliberação 23/123 da ESTBarreiro.	149
Figura AN 2 - Declaração de Desempenho das cinzas volantes.....	151
Figura AN 3 - Ficha técnica da areia lavada 0/2, emitida pelo "Grupo SOARVAMIL".	153
Figura AN 4 - Ficha técnica da areia lavada 0/4, emitida pelo "Grupo SOARVAMIL".	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Borracha natural e sintética em diferentes tipos de pneus, adaptado de Ctborracha (2024).....	17
Tabela 2 - Efeito do teor de borracha na porosidade do betão, adaptado de Turatsinze e Garros (2008).....	26
Tabela 3 - Relação água / ligante e resultados do espalhamento, adaptado de Carvalho (2019).	34
Tabela 4 - Massa volúmica das argamassas no estado fresco, adaptado de Carvalho (2019).	34
Tabela 5 - Resistência à flexão dos provetes de AC e AAA, adaptado de Carvalho (2019)..	35
Tabela 6 - Resistência à compressão dos provetes de AC e AAA, adaptado de Carvalho (2019).	35
Tabela 7 - Módulo de elasticidade dinâmico de AC e AAA, adaptado de Carvalho (2019)..	36
Tabela 8 - Massa volúmica aparente da AC e AAA, adaptado de Carvalho (2019).	36
Tabela 9 - Velocidade de propagação dos ultrassons, adaptado de Carvalho (2019).....	37
Tabela 10 - Identificação (ID) das argamassas formuladas.	48
Tabela 11 - Coordenadas das curvas de referência de Faury, adaptado de Silva (2007).	49
Tabela 12 - Valores das massas volúmicas necessárias ao cálculo da composição da argamassa.	51
Tabela 13 - Valores da razão entre vários componentes da argamassa.	51
Tabela 14 - Composição da argamassa de cimento de referência (ARC).	52
Tabela 15 - Curva granulométrica média ponderada da percentagem de acumulado passado de areias.	53
Tabela 16 - Cálculo da massa de areia com granulometrias 0-1 mm, 1-2 mm e 2-4 mm na ARC (2 Litros).	53
Tabela 17 - Composição das argamassas de cimento.	53
Tabela 18 - Composição da argamassa ativada alcalinamente de referência (ARAA).	55
Tabela 19 - Cálculo da massa de areia com granulometrias 0-1 mm, 1-2 mm e 2-4 mm na ARAA (2 Litros).	55
Tabela 20 - Composição das argamassas ativadas alcalinamente.	56
Tabela 21 - Ensaio a efetuar na primeira fase e normas aplicáveis.	59
Tabela 22 - Ensaio a efetuar na segunda fase nas argamassas no estado fresco.	65
Tabela 23 - Ensaio a efetuar na segunda fase nas argamassas no estado endurecido.	68
Tabela 24 - Determinação do valor do coeficiente de Poisson das argamassas.	72

Tabela 25 - Massa e percentagem de material retido nos peneiros.....	82
Tabela 26 - Percentagem de material passado nos peneiros.	82
Tabela 27 - Baridades dos agregados e precursores.	83
Tabela 28 - Massas volúmicas e absorção de água dos agregados.	84
Tabela 29 - Determinação da relação A/P pelo espalhamento das amassaduras preliminares.	85
Tabela 30 – Variação da consistência por espalhamento com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.	86
Tabela 31 - Variação da massa volúmica com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.	87
Tabela 32 - Variação da R.T. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.....	88
Tabela 33 - Variação da R.T. com a idade da argamassa.	89
Tabela 34 - Variação da R.T. com o tratamento da borracha com NaOH.	90
Tabela 35 - Variação da R.C. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.....	90
Tabela 36 - Variação da R.C. com a idade da argamassa.	91
Tabela 37 - Variação da R.C. com o tratamento da borracha com NaOH.	92
Tabela 38 - Variação do MED com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.....	93
Tabela 39 - Variação do MED com a idade da argamassa.	93
Tabela 40 - Variação do MED com o tratamento da borracha com NaOH.	94
Tabela 41 - Variação da P.A. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.....	95
Tabela 42 - Variação da P.A. com a idade da argamassa.	95
Tabela 43 - Variação da P.A. com o tratamento da borracha com NaOH.	96
Tabela 44 - Variação da M.V. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.....	96
Tabela 45 - Variação da M.V. com a idade da argamassa.	97
Tabela 46 - Variação da M.V. com o tratamento da borracha com NaOH.....	97
Tabela 47 - Variação da AAI com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.....	98
Tabela 48 - Variação da AAI com a idade da argamassa.	99
Tabela 49 - Variação da AAI com o tratamento da borracha com NaOH.	99
Tabela 50 - Variação do C.C. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.....	100
Tabela 51 - Variação do C.C. com a idade da argamassa.	100
Tabela 52 - Variação do C.C. com o tratamento da borracha com NaOH.....	101

Tabela 53 - Variação do V.A. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.	101
Tabela 54 - Variação do V.A. com a idade da argamassa.	102
Tabela 55 - Variação do V.A. com o tratamento da borracha com NaOH.	102
Tabela 56 - Variação da VPU com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.	103
Tabela 57 - Variação da VPU com a idade da argamassa.	104
Tabela 58 - Variação da VPU com o tratamento da borracha com NaOH.	104
Tabela 59 - Variação dos resultados devido à influência da borracha.	106
Tabela 60 - Variação dos resultados das propriedades devido à influência da idade das argamassas.	107
Tabela 61 - Variação dos resultados devido à influência do tratamento da borracha com NaOH.	107
Tabela 62 - Valor médio das propriedades das argamassas e relação AAA/AC.	108

APÊNDICES

Tabela AP 1 - Resumo dos resultados dos ensaios às argamassas de cimento.	119
Tabela AP 2 - Resumo dos resultados dos ensaios às argamassas de cinzas volantes.	120
Tabela AP 3 - Resultados dos ensaios de absorção de água e massa volúmica dos agregados.	120
Tabela AP 4 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento das argamassas.	120
Tabela AP 5 - Resultados do ensaio da massa volúmica das argamassas no estado fresco.	121
Tabela AP 6 - Resultados do ensaio da resistência à tração por flexão nas argamassas.	121
Tabela AP 7 - Resultados do ensaio da resistência à compressão nas argamassas.	121
Tabela AP 8 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico nas argamassas.	121
Tabela AP 9 - Resultados do ensaio da porosidade aberta nas argamassas.	122
Tabela AP 10 - Resultados do ensaio de massa volúmica no estado endurecido.	122
Tabela AP 11 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão.	122
Tabela AP 12 - Resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade.	123
Tabela AP 13 - Resultados do valor assintótico de absorção de água por capilaridade.	123
Tabela AP 14 - Resultados do ensaio VPU.	123
Tabela AP 15 - Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas a 28 e 56 dias.	125
Tabela AP 16 - Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão das argamassas a 28 e 56 dias.	126
Tabela AP 17 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico de cada provete a 28 dias.	127

Tabela AP 18 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico de cada provete a 56 dias.	128
Tabela AP 19 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas a 28 dias.	129
Tabela AP 20 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas a 56 dias.	130
Tabela AP 21 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão das argamassas.	131
Tabela AP 22 - Resultados do ensaio de porosidade aberta das argamassas a 28 dias.	132
Tabela AP 23 - Resultados do ensaio de porosidade aberta das argamassas a 56 dias.	133
Tabela AP 24 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.	134
Tabela AP 25 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.	135
Tabela AP 26 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.	136
Tabela AP 27 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.	137
Tabela AP 28 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.	138
Tabela AP 29 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.	139
Tabela AP 30 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.	140
Tabela AP 31- Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons a 28 dias.	145
Tabela AP 32 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons a 56 dias.	146

LISTA DE ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS

AAA	Argamassa ativada alcalinamente
AAA-T	Argamassa ativada alcalinamente com borracha tratada com NaOH
AAC	Absorção de água por capilaridade
AAI	Absorção de água por imersão
AC	Argamassa de cimento
AC-T	Argamassa de cimento com borracha tratada com NaOH
AF	Areia fina (0-2 mm)
AF_m	Monosulfato de aluminato de cálcio
AF_t	Etringite/ Trisulfato de aluminato de cálcio
AG	Areia grossa (0-4 mm)
AlO₄⁵⁻	Aluminato
Al₂O₃	Alumina /Óxido de alumínio
A/P	Relação água/precursor
ARAA	Argamassa de referência ativada alcalinamente
ARC	Argamassa de referência de cimento
A5AA	Argamassa ativada alcalinamente com 5 % de borracha normal
A5AA-T	Argamassa ativada alcalinamente com 5% de borracha tratada em NaOH
A5C	Argamassa de cimento com 5 % de borracha normal
A5C-T	Argamassa de cimento com 5 % de borracha tratada em NaOH
A10AA	Argamassa ativada alcalinamente com 10 % de borracha normal
A10AA-T	Argamassa ativada alcalinamente com 10 % de borracha tratada em NaOH
A10C	Argamassa de cimento com 10 % de borracha normal
A10C-T	Argamassa de cimento com 10 % de borracha tratada em NaOH
A20AA	Argamassa ativada alcalinamente com 20 % de borracha normal
A20AA-T	Argamassa ativada alcalinamente com 20 % de borracha tratada em NaOH
A20C	Argamassa de cimento com 20 % de borracha normal
A20C-T	Argamassa de cimento com 20 % de borracha tratada em NaOH

CaCO₃	Calcário
C-A-S-H	Aluminossilicato de cálcio hidratado
CaO	Óxido de cálcio
C.C.	Coeficiente de absorção de água por capilaridade
CH	Hidróxido de cálcio
Cl₂	Cloro
CO₂	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratados
C₃A	Celite/ Aluminato tricálcico
C₄AF	Ferrite/ Alumino ferrato tetracálcico
C₂S	Belite/ Silicato bicálcico
C₃S	Alite/ Silicato tricálcico
D.P.	Desvio Padrão
ESTBarreiro	Escola Superior de Tecnologia do Barreiro
Fe₂O₃	Óxido de ferro
H₂	Hidrogénio
H₂O	Água
ID	Identificação da argamassa
IPS	Instituto Politécnico de Setúbal
MAA	Materiais ativados alcalinamente
MED	Módulo de elasticidade dinâmico
MÉDIA P.	Média ponderada
M.V.	Massa volúmica
NaCl	Cloreto de sódio
Na₂CO₃	Carbonato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
N-A-S-H	Aluminossilicato de sódio hidratado
Na₂SiO₃	Silicato de sódio
P.A.	Porosidade aberta
R.C.	Resistência à compressão
R.T.	Resistência à tração por flexão
SiO₂	Sílica / Dióxido de silício
SiO₄⁴⁻	Silicato
SSS	Solução de silicato de sódio

V.A.	Valor assintótico de absorção de água por capilaridade
VPU	Velocidade de propagação de ultrassom
WA	Absorção de água pelos agregados
ZTI	Zona de transição interfacial
ρ_a	Massa volúmica do material impermeável das partículas de agregado
ρ_{ssd}	Massa volúmica das partículas saturadas dos agregados com superfície seca
ρ_{rd}	Massa volúmica das partículas secas em estufa

1 INTRODUÇÃO

A elaboração da presente dissertação, subordinada ao título “Argamassas ativadas alcalinamente com borracha de pneus usados”, insere-se no plano curricular do Mestrado em Engenharia Civil, lecionado na Escola Superior de Tecnologia do Barreiro (ESTBarreiro), do Instituto Politécnico de Setúbal (IPS) (Anexo A).

Por definição, as argamassas são misturas de ligantes, agregados, água de amassadura, com possibilidade de adição de adjuvantes e aditivos, sendo amplamente utilizadas na construção com funções de isolamento, reparação estrutural, revestimento, enchimento e assentamento. Nesta dissertação, pretende-se avaliar o desempenho físico e mecânico de argamassas ativadas alcalinamente de cinzas volantes contendo agregados reciclados de borracha provenientes de pneus em fim de vida, comparando com o desempenho de argamassas de cimento contendo borracha, através da realização de ensaios laboratoriais.

Deste modo, a dissertação enquadra-se no desenvolvimento e caracterização de materiais de construção que permitam mitigar o impacto ambiental do sector da construção. A motivação subjacente a este trabalho de investigação prende-se com o facto de que a sustentabilidade é uma preocupação para a indústria da construção civil, uma vez que a indústria da construção civil é responsável pelo consumo de uma grande quantidade de recursos naturais e por gerar grandes impactos ambientais.

Neste contexto, o trabalho de investigação tem como objetivo o estudo da utilização de agregados reciclados de borracha de pneus na composição da argamassa, contribuindo com uma alternativa sustentável para o problema do depósito de pneus após a sua vida útil. Assim, a utilização de agregados reciclados em substituição dos agregados naturais é benéfica por minimizar os impactos ambientais e o consumo de recursos naturais e por permitir a redução de alguns problemas urbanos associados à acumulação de resíduos (Santos e Rodrigues, 2015).

Por outro lado, esta investigação versa sobre o estudo das propriedades de argamassas ativadas alcalinamente à base de cinzas volantes, considerando que é um ligante com origem em resíduos industriais que pode ser aproveitado na indústria da construção civil em substituição do cimento. Os materiais ativados alcalinamente são um substituto sustentável à utilização do cimento, considerando que apresentam vantagens económicas e ambientais, pelo que interessa investigar e comparar as propriedades mecânicas e físicas de argamassas com cinzas volantes e de argamassas com cimento.

Em resumo, o tema desta investigação mostra-se relevante podendo vir a contribuir para a diminuição do consumo de recursos naturais e dos impactes económicos e ambientais com a utilização de resíduos como material alternativo para a construção civil.

De seguida, nesta introdução, também são abordados o contexto e motivação do trabalho, os objetivos da dissertação e a organização do documento.

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

A redução do impacto ambiental do sector da construção tem sido, nos últimos anos, uma das principais prioridades da investigação em Engenharia Civil. A indústria cimenteira, por exemplo, produz aproximadamente 5-7% das emissões globais anuais de CO₂ antropogénico, estimando-se que são emitidos para a atmosfera cerca de 750 kg de CO₂ para a produção de uma tonelada de cimento, conforme descrito por Benhelal *et al.* (2013) e Suescum-Morales *et al.* (2022). Uma opção para descarbonizar o setor da construção é procurar novas soluções que reduzam a utilização de cimento Portland. Materiais ativados alcalinamente são vistos como uma alternativa para reduzir o uso de cimento Portland. Estes materiais são apresentados como um componente do conjunto atual e futuro de "sistemas de ligantes sustentáveis". Esses ligantes podem ser produzidos a partir de uma ampla gama de precursores de aluminossilicato resultantes de diversos processos industriais como é o caso da cinza volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e escória granulada moída de alto-forno, entre outros (Suescum-Morales *et al.*, 2022). Nesta investigação, serão produzidas argamassas de cinzas volantes enquanto alternativa às argamassas de cimento.

Por exemplo, embora o produto da reação de ativação de cinzas volantes seja semelhante ao resultante da hidratação do cimento Portland comum, o processo em si implica algumas vantagens financeiras e ambientais em relação à fabricação tradicional do cimento Portland, pelo que são utilizadas desde há muitos anos no fabrico do betão (Fernández-Jiménez

et al., 2005). As cinzas volantes representam ganhos significativos no custo do ligante dos betões e argamassas, principalmente porque permitem reduzir o consumo de cimento, quando incorporadas nas condições e proporções adequadas. Por outro lado, o ambiente também tem ganhos significativos pela utilização da cinza volante por permitir a redução do consumo de cimento que leva a uma redução direta das emissões de CO₂ associadas à produção do cimento e também porque existe aproveitamento de subproduto industrial. Como adição do cimento, a par das vantagens económicas e ambientais, as cinzas volantes também contribuem para outras melhorias nos betões e nas argamassas, como por exemplo (ECO2M, 2024):

- Diminuição das resistências mecânicas nas primeiras idades, mas incremento da evolução da resistência mecânica até idades muito superiores às do cimento Portland;
- Obtenção de maior trabalhabilidade no betão em estado fresco, sem necessidade de aumentar a relação água/cimento;
- Aumento da compacidade do betão, conferindo-lhe maior resistência à penetração de agentes agressivos, o que se traduz numa maior durabilidade do betão;
- Diminuição da absorção e permeabilidade dos betões e argamassas, reduzindo significativamente o aparecimento de eflorescências e respetivos problemas estéticos.

Um outro sector responsável por um elevado impacte ambiental é o sector automóvel, considerando que é necessário encontrar uma solução para cerca de mil milhões de pneus que todos os anos chegam ao fim da sua vida útil em todo o planeta, estimando-se que cerca de metade sejam descartados em aterros, sem qualquer tipo de tratamento (Tomas e Gupta, 2016). Face a esta realidade, uma possibilidade que tem vindo a ser estudada é a utilização de granulado de pneus em fim de vida como agregados reciclados em betões e argamassas, substituindo a utilização dos agregados naturais. De facto, esta aplicação contribui para a redução da massa volúmica e da fragilidade dos betões e argamassas mas, por outro lado, reduz substancialmente a resistência mecânica destes materiais. Uma das principais razões para esta consequência é a fraca aderência entre a matriz cimentícia e os agregados de borracha. Em 2016, Mohammadi *et al.* (2016) verificaram ser viável melhorar a aderência matriz-agregados de borracha de betões, fazendo um pré-tratamento dos agregados de borracha com hidróxido de sódio (NaOH). De facto, esta solução alcalina também é utilizada na composição de argamassas de materiais ativados alcalinamente, pelo que pode influenciar o desempenho das argamassas.

Assim, nesta investigação, serão produzidas argamassas de cinzas volantes e de cimento contendo borracha de pneus usados, com e sem tratamento da borracha com hidróxido de sódio.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Como objetivo geral, pretende-se propor uma solução sustentável utilizando cinzas volantes como ligante e agregados de reduzido impacto ambiental. Assim, nesta dissertação propõe-se o estudo comparativo de argamassas de cimento e ativadas alcalinamente contendo agregados de borracha de pneus usados. Esta borracha será utilizada para substituir os agregados naturais, em diferentes percentagens (5%, 10% e 20%), em volume.

Conforme referido, o objetivo é o de avaliar o desempenho físico e mecânico destes materiais (cimento e cinzas volantes) e, em particular, verificar se o facto de se utilizar um material ativado alcalinamente (MAA) ajuda a mitigar a redução da resistência mecânica das argamassas que se verifica quando se utiliza agregados de borracha. Assim, visa-se obter e avaliar rigorosamente o desempenho destas argamassas sustentáveis, através da realização de uma campanha experimental. Para tal, os objetivos operacionais preconizados são:

- Caracterização física dos materiais a utilizar na produção das argamassas;
- Determinação das relações água/precursor (A/P) que resultam numa trabalhabilidade (avaliada por espalhamento) compatível com a aplicação das argamassas;
- Avaliação da influência da taxa de substituição de areia por agregados de borracha nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas que utilizam o cimento como ligante;
- Avaliação da influência da taxa de substituição de areia por agregados de borracha nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas que utilizam a cinza volante como ligante;
- Avaliação da influência do tratamento da borracha com solução de hidróxido de sódio nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas que utilizam cimento ou cinza volante como ligante;
- Avaliação da influência da idade (28 e 56 dias) nas propriedades das argamassas;
- Avaliação global das propriedades físicas e mecânicas, para comparar o desempenho das argamassas de cimento com as de cinzas volantes.

Os ensaios laboratoriais realizados na campanha experimental são os convencionais, sem especificidades associadas a aplicações particulares das argamassas (por exemplo, assentamento, revestimento, etc.).

1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A dissertação está dividida em cinco capítulos, de modo a organizar toda a informação recolhida em vários estudos, como a obtida nesta investigação.

Na introdução, primeiro capítulo, são apresentados o tema da dissertação e as razões da sua escolha, assim como os objetivos e a organização do trabalho.

No segundo capítulo, o estado da arte, é apresentada a informação recolhida em elementos fiáveis, como trabalhos publicados internacionalmente, livros e dissertações. Nesta parte são compiladas informações sobre as investigações efetuadas com foco em argamassas/betões de cimento e materiais ativados alcalinamente com substituição de agregados por borracha de pneus em fim de vida. O conhecimento adquirido nesta parte ajudou a compreender os resultados obtidos na campanha experimental.

A terceira parte da investigação (capítulo 3 - campanha experimental) apresenta o plano experimental, assim como os materiais utilizados na produção das argamassas e a identificação de cada uma. Os ensaios das argamassas, nos estados fresco e endurecido, realizados segundo normas existentes em Portugal e na Europa, também são explicados neste capítulo. Toda a campanha experimental foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil, da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, e no Laboratório de Construção, do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos (DECivil), do Instituto Superior Técnico, em Lisboa.

Depois de concluir a campanha experimental, os resultados obtidos foram organizados e faz-se a sua análise no capítulo 4 - apresentação e discussão dos resultados. Neste capítulo, são feitas remissões para os resultados da literatura apresentada no capítulo 2.

No quinto e último capítulo da dissertação (conclusões e desenvolvimentos futuros), é apresentada a informação mais importante obtida no capítulo 4, destacando-se os resultados de maior relevância. Considerando que o estudo dos ligantes ativados alcalinamente é muito importante, também são apresentadas propostas para desenvolvimentos futuros, com base na investigação efetuada nesta dissertação.

No final do documento são apresentadas todas as referências bibliográficas consultadas no decorrer desta dissertação e são incorporados os anexos e apêndices referentes ao tratamento de dados recolhidos na campanha experimental.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, ir-se-á abordar os principais conceitos e conhecimentos referentes ao tema em estudo. Tendo em consideração a vasta literatura científica existente, foi efetuada uma revisão bibliográfica para resumir a informação focando sobre os aspetos mais relevantes.

Considerando que nesta investigação foram produzidos dois tipos de argamassas utilizando precursores distintos, o cimento e as cinzas volantes, importa conhecer a origem destes ligantes e analisar as reações que levam ao seu endurecimento, designadamente através do processo de hidratação do cimento e da ativação alcalina das cinzas volantes, denominada “geopolimerização”.

Assim, vai-se elencar os principais conhecimentos adquiridos na investigação de argamassas e de betões com MAA, direcionando o estudo para as argamassas com cinzas volantes. Por outro lado, a substituição de agregado natural (areias) por agregados de borracha de pneu usado em argamassas também é uma vertente importante desta investigação, pelo que importa resumir os resultados obtidos em alguns estudos já realizados sobre argamassas e betões com agregados de borracha.

2.1 REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O cimento é um dos materiais mais utilizados no mundo e o consumo de cimento tem tendência a aumentar acompanhando o crescimento da população mundial. De acordo com a NP EN 197-1 (2012), o cimento é um ligante hidráulico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que ganha presa e endurece por reações e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água.

De acordo com Gomes *et al.* (2013), o cimento Portland é obtido de uma mistura de matérias-primas devidamente proporcionada de calcário e argila ou xisto argiloso ou de margas ou de calcários margosos. Assim, verifica-se que a extração destes materiais na Natureza coloca problemas ambientais e de sustentabilidade, tendo em consideração a elevada procura e a necessidade crescente destes materiais para satisfazer o setor da construção. Revela-se assim imprescindível a investigação científica com vista à utilização de outros ligantes para substituição do cimento em argamassas e betões, sendo este o contexto no qual se insere este trabalho.

Após a extração dos materiais, procede-se à mistura e moagem dos mesmos, sendo que à mistura de 75% de calcário (CaCO_3) e 25% de argila homogeneizada finamente moída dá-se o nome de cru. Após cozedura do cru no forno (800°C), o que permite perda de água e origina dióxido de carbono (CO_2), a sua composição é a seguinte: 60-69% de óxido de cálcio (CaO), 17-25% de sílica (SiO_2), 2-9% de alumina (Al_2O_3) e 0,5-6% de óxido de ferro (Fe_2O_3). Verifica-se que a cozedura do cru provoca impactes ambientais pela emissão de elevadas quantidades de CO_2 na atmosfera, um dos principais gases que provocam o efeito de estufa, bem como elevados consumos energéticos por meio de combustíveis utilizados para aquecer os fornos. Gomes *et al.* (2013) descrevem que o cru é depois calcinado num forno rotativo a uma temperatura de 1450°C .

Os produtos de calcinação são clinquerizados para se obter o clínquer, o principal composto do cimento, que contém: 20-65% de silicato tricálcico (alite – $3\text{CaOSiO}_2 - \text{C}_3\text{S}$), 10-55% de silicato bicálcico (belite – $2\text{CaOSiO}_2 - \text{C}_2\text{S}$), 0-15% aluminato tricálcico (celite – $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 - \text{C}_3\text{A}$) e 5-15% de aluminoferrato tetracálcico (ferrite – $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{C}_4\text{AF}$). O clínquer é arrefecido, finamente moído, misturado com gesso (3 a 5%) e armazenado, sendo que à mistura de clínquer e gesso chama-se cimento.

Os cimentos para construção encontram-se sujeitos a normalização pela NP EN 197-1 (2012) e os que se encontram de acordo com esta norma têm a designação de CEM. É possível obter modificações das propriedades do cimento mediante o recurso a adições, sendo que as adições são materiais inorgânicos que se adicionam ao cimento Portland, substituindo parte do clínquer, com o objetivo de melhorar as suas características e por razões ambientais e económicas. Alguns exemplos de adições são os seguintes: calcário, escória de alto forno, sílica de fumo, cinzas volantes, pozolanas e xisto cozido. Por exemplo, a adição de cinzas volantes no cimento Portland tem vantagens económicas e ambientais, contribuindo também para muitas outras melhorias nos betões e argamassas, designadamente, as seguintes (Neves, 2022):

- O incremento da evolução da resistência mecânica até idades muito superiores às do cimento Portland;
- A obtenção de melhor trabalhabilidade no betão em estado fresco sem necessidade de aumentar a relação A/P, tornando o acabamento superficial mais liso;
- A redução do calor de hidratação, reduzindo as tensões internas nos primeiros dias;
- A melhor resistência química;
- A diminuição da absorção e permeabilidade dos betões e argamassas, que reduz significativamente o aparecimento de eflorescências e respetivos problemas estéticos;
- A capacidade de produzir um efeito de filler, que torna a matriz mais densa e homogénea, através do preenchimento dos vazios deixados entre as partículas do cimento, impedindo de forma mais eficiente a degradação, pelo aumento da compacidade do betão (redução da permeabilidade), conferindo-lhe maior resistência à penetração de agentes agressivos, o que se traduz numa maior durabilidade do betão (ECO2M, 2024).

Assim, de acordo com a normalização em vigor, NP EN 197-1 (2012), são identificados 27 cimentos existentes no espaço europeu com diferentes adições, agrupados em 5 tipos principais: Cimento Portland (CEM I), Cimento Portland Composto (CEM II), Cimento de alto forno (CEM III), Cimento Pozolânico (CEM IV) e Cimento Composto (CEM V).

Relativamente às reações de hidratação do cimento verifica-se que os quatro principais minerais constituintes do cimento (alite, belite, celite e ferrite), cristalinos, reagem com a água dando origem a uma variedade de produtos de hidratação. Assim, quando a alite reage com a água dá origem ao hidróxido de cálcio (CH) e aos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Quando a belite reage com a água dá origem a C-S-H, e não é produzido CH ou a sua produção é mínima. A celite combinada com água e gesso dá origem ao trissulfato de aluminato de cálcio, comumente denominado por etringite (AF_t), e a ferrite quando combinada com água e gesso formam o monossulfato de aluminato de cálcio, designado por monossulfato (AF_m) (figura 1).

De acordo com Anjos (2009), o hidróxido de cálcio representa 20 a 25% de sólidos no volume de uma pasta de cimento hidratada e confere alcalinidade à argamassa, que é responsável pela passivação das armaduras no betão, sendo, no entanto, vulnerável ao ataque por soluções ácidas. A fase de C-S-H constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratada, sendo o principal responsável pelas propriedades mecânicas da pasta, pelo que o hidróxido de cálcio tem pouca contribuição na

resistência quando comparado com o C-S-H. Os sulfatos aluminatos de cálcio (AF_t e AF_m) ocupam 15 a 20 % do volume de sólidos de uma pasta de cimento.

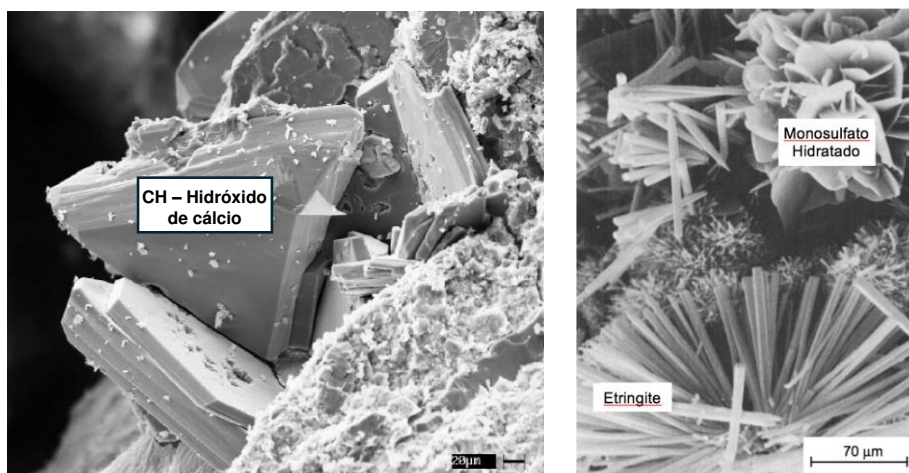


Figura 1 - Produtos de hidratação do cimento Portland, adaptado de Gomes *et al.* (2013).

2.2 REAÇÕES DE POLIMERIZAÇÃO DE LIGANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE

Atualmente, os materiais ativados alcalinamente são utilizados como uma alternativa sustentável para reduzir o uso de cimento Portland. Deste modo, as argamassas ativadas alcalinamente (AAA) distinguem-se das argamassas de cimento (AC) porque, além de serem compostas por um precursor substituto do cimento, agregados finos, água e adjuvantes, também são compostas pelo ativador alcalino que facilita o endurecimento da mistura através da reação de ativação alcalina. Assim, é óbvio que as diferenças entre as AC e AAA são o próprio material precursor e a solução ativadora.

De acordo com Torgal e Jalali (2009), teoricamente, qualquer material composto por sílica e alumina pode ser ativado alcalinamente, sendo que as investigações realizadas até ao momento abrangeram o estudo de vários precursores. Carvalho *et al.* (2021) e Suescum-Morales *et al.* (2022) referem que vários investigadores estudaram precursores de aluminossilicato de diversos processos industriais (cinzas volantes, sílica ativa, cinzas de casca de arroz, cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, escórias de alto forno e metacaulino, entre outros) e ativadores alcalinos (por exemplo, hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, silicato de sódio, etc.), existindo diversas teorias sobre o processo de ativação alcalina.

Em 1908 foi patenteada pela primeira vez, pelo engenheiro alemão Hans Kühl, a reação de uma fonte alcalina com um precursor sólido contendo alumina e sílica, como meio de formar um material sólido comparável ao cimento Portland endurecido (Provis e Deventer, 2014).

Relativamente aos precursores, Neves (2022) e Marvila *et al.* (2021) referem que os MAA podem ser agrupados em duas classes principais consoante as quantidades de cálcio (CaO), sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃): (1) ligantes ricos em cálcio, cuja relação Ca/(Si+Al) é maior do que 1 e (2) ligantes pobres em cálcio, que constituem a classe dos geopolímeros.

No primeiro grupo, materiais ricos em cálcio, tal como as escórias de alto forno, são ativados em condições alcalinas relativamente moderadas, sem atingir o pH máximo, onde o principal produto proveniente das reações de hidratação é um gel C-A-S-H (aluminossilicato de cálcio hidratado), produto similar ao que é obtido durante a hidratação do cimento Portland. Fernández-Jimenez (2000) propôs um modelo para a estrutura do gel C-A-S-H (figura 2), onde é possível observar as cadeias de ligação de tetraedros de silicatos com tetraedros de aluminatos entre as quais se posicionam os compostos iónicos de CaO (entre as linhas horizontais do modelo).

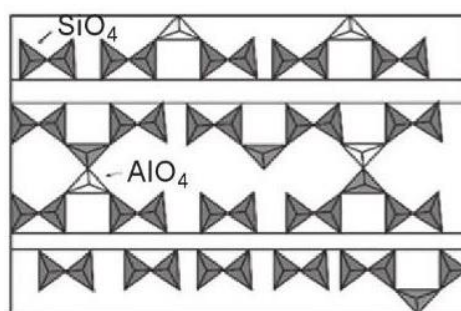


Figura 2 - Modelo da estrutura do gel C-A-S-H (Fernández-Jimenez, 2000).

No segundo grupo, os MAA têm como sua principal composição a sílica e a alumina, tal como as cinzas volantes classe F, com teores de cálcio muito baixos. Neste caso, as condições alcalinas para que estes materiais sejam ativados são necessariamente mais agressivas (com pH mais elevado), sendo até preciso temperaturas de cura mais elevadas. O principal produto proveniente das reações é um gel N-A-S-H (aluminossilicato de sódio hidratado), formando este um polímero inorgânico de estrutura tridimensional. Davidovits, trabalhando em França, patenteou numerosas formulações à base de aluminossilicato a partir do início da década de 1980, e foi o primeiro que aplicou a denominação “geopolímero” a estes materiais. O termo geopolímero foi aplicado a uma vasta gama de betões ou argamassas ativados alcalinamente, mas mais frequentemente aos que recorrem a precursores com baixo teor de cálcio ou a sistemas isentos de cálcio, derivados de cinzas ou argilas (Provis e Deventer, 2014). Assim, o termo "geopolímero" foi utilizado em substituição ao mais geral "MAA",

devido ao papel primário do aluminossilicato e fase de ligação altamente coordenada (Panizza *et al.*, 2018).

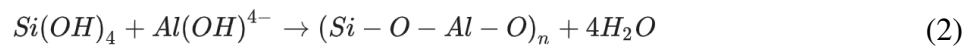
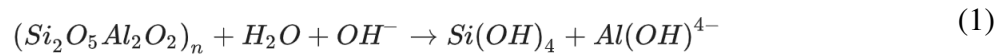
Relativamente às fontes de ativação alcalina utilizadas nas argamassas, podem incluir hidróxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos ou óxidos, ou seja, essencialmente uma substância solúvel que possa fornecer catiões metálicos alcalinos, aumentar o pH da mistura de reação e acelerar a dissolução do precursor sólido. Os dois ativadores alcalinos mais utilizados na produção dos geopolímeros são o hidróxido de sódio (NaOH) e o silicato de sódio (Na_2SiO_3), isoladamente ou em conjunto. Refira-se que o fabrico destes ativadores alcalinos traz alguns impactes ambientais, principalmente no caso do Na_2SiO_3 . No entanto, o desenvolvimento da resistência das misturas ativadas alcalinamente está fortemente dependente da sua utilização e, por outro lado, apresentam custos mais acessíveis do que outros ativadores alcalinos. O NaOH é predominantemente produzido através da reação de eletrólise onde se utiliza o NaCl (sal de cozinha) numa solução aquosa, resultando também, em paralelo, cloro (Cl_2) e hidrogénio (H_2). O silicato de sódio é produzido pela fusão de areia de sílica (SiO_2) com carbonato de sódio (Na_2CO_3) a altas temperaturas, o que origina um consumo de energia associado e emissões de CO_2 . Na ativação alcalina, a concentração de NaOH promove a solubilidade e a dissolução dos aluminossilicatos, acelerando a taxa de reação da geopolimerização, sendo que esse parâmetro é dependente do pH e determina o número de iões para servir o processo de dissolução. De acordo com Provis e Deventer (2014), a solubilidade do cálcio diminui em pH mais elevado, enquanto que as solubilidades da sílica e alumina aumentam. As soluções ativadoras de NaOH propiciam um pH mais elevado do que as soluções de silicato de sódio. Neto (2021) refere que a presença de silicato alcalino na solução ativadora é essencial e leva a uma melhor microestrutura e, conseqüentemente, a resistências mais elevadas, porquanto induz uma certa quantidade de SiO_2 solúvel necessária à reação de policondensação. Desta forma, devido à sua natureza alcalina, o silicato de sódio exibe propriedades adesivas e aglutinantes, verificando-se que atua como um aglutinante, reagente alcalino e dispersante ou plastificante.

Relativamente à reação de ativação alcalina propriamente dita, apesar da investigação já realizada, verifica-se que ainda não é bem conhecido o mecanismo exato através do qual os MAA ganham presa e endurecem, considerando que isso esteja dependente tanto do material de partida como do ativador (Torgal e Jalali, 2009), interessando, assim, abordar os estudos realizados por vários autores.

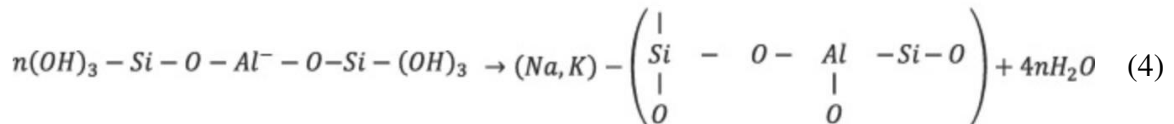
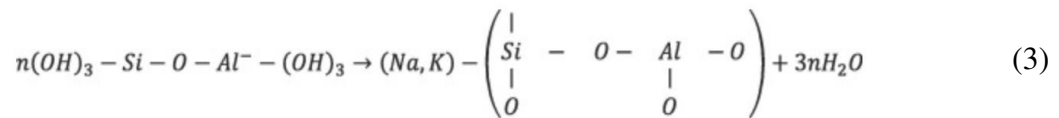
De acordo com Suescum-Morales *et al.* (2022), o processo de ativação alcalina envolve a dissolução de um aluminossilicato sólido (precursores) em condições alcalinas (ativador

alcalino) sob hidratação superficial das partículas dos precursores, seguida de coagulação, gelificação e policondensação, para formar um gel e, posteriormente, uma estrutura polimérica inorgânica endurecida. Segundo os autores, o processo de reação química em MAA pode ser resumido em quatro etapas:

- (i) Dissolução iônica e etapa de libertação, ou seja, dissolução do precursor com o ativador. Os íons sódio (Na^+) e hidróxido (OH^-) do ativador entram rapidamente no sistema e atacam a superfície das partículas do precursor, de acordo com as equações (1) e (2). Esta etapa é profundamente afetada pelas temperaturas de cura, considerando que alta temperatura de cura catalisa a atividade OH^- ;



- (ii) Etapa de reconstituição iônica, sendo que a principal característica desta etapa é a reconstrução e policondensação dos elementos tetraédricos SiO_4 e AlO_4 , de acordo com as equações (3) e (4). Além da temperatura de cura, o papel da água no sistema também é importante;



- (iii) Etapa de aceleração do endurecimento;
(iv) Etapa de desaceleração do endurecimento.

Estes autores, baseando-se em Glukhovsky *et al.* (1980), referem que o mecanismo de ativação alcalina pode ser entendido como um conjunto de reações de destruição-condensação, que incluem a destruição do material de partida em unidades estruturais pouco estáveis, a sua interação com estruturas de coagulação e a criação de estruturas de condensação. De acordo com os autores, nas primeiras etapas há uma quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si, que acontece quando se aumenta o pH da solução em virtude da adição de metais alcalinos presentes na solução do ativador alcalino e, conseqüente, transformação daqueles grupos numa fase coloidal. Numa segunda fase, há uma acumulação dos produtos destruídos, que

interagindo entre si vão formar uma estrutura coagulada a partir da qual vão ocorrer os processos de policondensação, que numa terceira etapa conduzem à condensação da estrutura.

Krivenko (2017) identifica três fases no procedimento de ativação alcalina. Na primeira fase, há uma destruição das ligações covalentes (Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si) através do aumento do pH da mistura, para valores entre 9 e 12, com a introdução de metais alcalinos presentes no ativador alcalino. Com a quebra das ligações covalentes, obtém-se uma solução com catiões e aniões numa fase coloidal (figura 3). A etapa seguinte consiste na ligação dos catiões dos metais alcalinos com os aniões $\equiv\text{Si-O}^-$, neutralizando-os nos processos de policondensação (reações de polimerização). Por fim, a última fase envolve o processo de formação da estrutura. Sendo assim, os catiões alcalinos participam em todas as fases, quebrando as ligações covalentes, impedindo reações de reversão, neutralizando os aniões $\equiv\text{Si-O}^-$ e ajudando nos processos de condensação da estrutura.

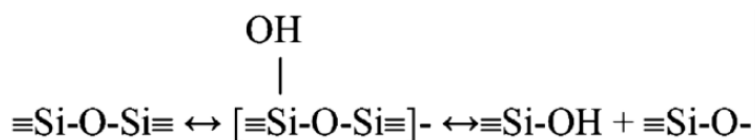


Figura 3 - Quebra de ligações covalentes no precursor (Krivenko, 2017).

De acordo com Neves (2022), o mecanismo de ativação de geopolímeros consiste em 3 fases (destruição-coagulação, coagulação-condensação e condensação-cristalização):

- A primeira fase começa quando os iões OH^- presentes no ativador alcalino quebram as ligações Si-O-Si ao redistribuírem a sua densidade eletrónica sobre os átomos de sílica, criando espécies de sílica ($-\text{Si-OH}$ e $-\text{Si-O}^-$). A presença de um catião alcalino, como o Na^+ , neutraliza a carga negativa e funciona como catalisador, ao formar $\text{Si-O}^-\text{Na}^+$. O mesmo acontece para espécies de Si-O-Al, formando espécies complexas como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$;
- Na segunda fase, a acumulação de espécies iónicas favorece o contacto entre os produtos desagregados e a polimerização começa, dando origem a estruturas coaguladas. Espécies de sílica reagem entre si através de ligações Si-O-Si, até que se formam polímeros, em que os iões OH^- são os catalisadores destas reações de polimerização. Nesta fase, os catiões alcalinos agem como um componente estrutural;
- Por último, a interação com os precursores dá-se início através da dissolução de aluminatos presentes no material e a formação de espécies iónicas mais complexas. Após o núcleo destas espécies atingir o seu tamanho crítico, a estrutura cristalina começa a crescer e a expandir-se. Quando a solução atinge a sua saturação, o gel N-

A-S-H é formado e precipita. Neto (2021) refere que o geopolímero tem estrutura amorfa a semicristalina com redes poliméricas de Si – O – Al tridimensionais, onde as associações de SiO₄ e AlO₄ tetraédricos estão ligados alternativamente e compartilhado por átomos de oxigênio, deixando uma carga negativa no Al⁻, que é então balanceado por cátions da solução alcalina como Na⁺, pelo que a presença de cátions é importante para manter a neutralidade da estrutura. Palomo *et al.* (2005) propuseram um modelo para a estrutura tridimensional do gel N-A-S-H, que se apresenta na figura 4.

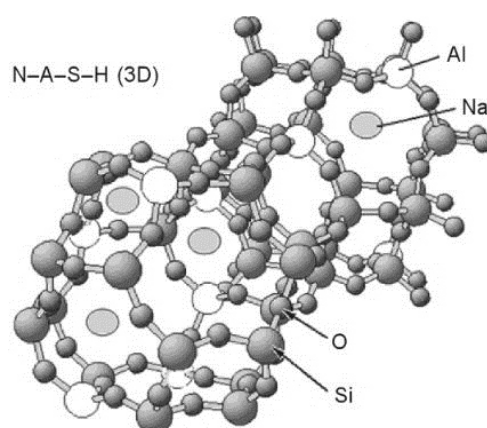


Figura 4 - Modelo da estrutura do gel N-A-S-H (Palomo *et al.*, 2005).

Assim, em resumo, verifica-se que os vários autores descrevem processos semelhantes de ativação alcalina, envolvendo a dissolução de um aluminossilicato sólido em condições alcalinas (ativador alcalino) com hidratação superficial das partículas dos precursores, seguida de coagulação, gelificação e policondensação para formar um gel e, posteriormente, uma estrutura tridimensional polimérica inorgânica endurecida, no estado amorfo a semicristalino.

Neto (2021) entende que as misturas ativadas alcalinamente podem ser curadas normalmente à temperatura ambiente, porém um aumento adequado de temperatura pode conduzir a uma melhoria significativa das suas propriedades. Neves (2022) refere que, devido à matriz vítrea, as misturas ativadas alcalinamente requerem sempre temperaturas elevadas (70° C) durante as primeiras horas de cura, de modo a aumentar a energia de ativação e melhorar a sua resistência nos primeiros dias, uma vez que é necessário que a sua fração vítrea se solubilize através de uma reação endotérmica. Deste modo e de acordo com Panizza *et al.* (2018), a temperatura de cura influencia o ganho de resistência dos geopolímeros, uma vez que temperaturas mais elevadas durante as primeiras fases de presa até 24 horas promovem as reações de geopolímeros e melhoram a qualidade do material. Assim, as argamassas geopoliméricas são submetidas a cura térmica para catálise das reações, aumentando a energia de ativação e melhorando a resistência nos primeiros dias, sendo esta uma desvantagem em

comparação com as argamassas de cimento, visto que limita a sua produção em obra. No entanto, podem existir aplicações destas argamassas de geopolímeros em elementos pré-fabricados.

Verificam-se ainda outras desvantagens quanto à utilização da ativação alcalina, em relação às argamassas de cimento, pelo que destacamos as seguintes:

- Aumento do tempo de presa;
- Baixos valores de resistência às primeiras idades da argamassa/betão;
- A alcalinidade das AAA é semelhante à das AC com o pH entre 12,5 e 13,5, no entanto, os ligantes ativados alcalinamente não formam hidróxido de cálcio (CH) que age como um regulador de pH nas argamassas de cimento. Assim, qualquer perda de alcalinidade devido à lixiviação ou carbonatação não pode ser compensada, onde o CH iria ser consumido pelo processo de carbonatação formando carbonato de cálcio. Nestas condições, o pH das AAA diminui mais rapidamente do que nas AC e quando o pH se encontra em valores críticos inferiores a 10/11, a película passiva das armaduras é destruída e inicia-se o mecanismo de corrosão. Resulta daqui que a capacidade das AAA em manter a alta alcalinidade é inferior à das misturas com cimento Portland (Neves, 2022).

No entanto, nos últimos anos, os materiais ativados alcalinamente têm recebido cada vez mais atenção da comunidade científica devido à sua combinação única de excelentes propriedades mecânicas, durabilidade, baixas emissões de CO₂ e consumo de energia. Os materiais ativados alcalinamente são caracterizados como promissores devido à sua capacidade de desenvolver propriedades tixotrópicas, elevada resistência mecânica, resistência química, resistência a choques térmicos e ao calor, dureza superficial e durabilidade (Neto, 2021).

2.3 ARGAMASSAS E BETÕES COM AGREGADOS DE BORRACHA

De acordo com Meneguini (2011), as borrachas, ou elastómeros, são materiais poliméricos formados por sucessivas ligações químicas de grande número de moléculas fundamentais, cujas dimensões podem variar bastante, quando submetidas a tensões mecânicas e que voltam às dimensões iniciais, ou quase, quando se retira a solicitação responsável pela deformação, ou seja, têm comportamento elástico.

Atualmente as borrachas sintéticas são mais utilizadas do que a borracha natural, sendo ambas consideradas elastómeros. A borracha natural é resultado da coagulação do latex de

determinadas plantas, sendo a principal a “*Hevea Brasiliensis*”, nome científico dado à árvore seringueira. As borrachas sintéticas mais comuns são obtidas por meio da polimerização do acetileno, que produz o neopreno (Brasilecola, 2024).

Segundo Meneguini (2011), os pneus são produzidos a partir de elastômeros vulcanizados, onde os polímeros mais utilizados são as borrachas naturais, de butadieno ou de estireno-butadieno, entre outros, cujas concentrações variam de acordo com o fabricante e com a utilização do pneu (tabela 1).

Tabela 1 - Borracha natural e sintética em diferentes tipos de pneus, adaptado de Ctborracha (2024).

Tipo de pneu	Borracha natural [%]	Borracha Sintética [%]
Para veículos de passageiros	45	55
Para veículos de mercadorias até 3,5 ton	50	50
Para veículos de mercadorias	60	40
Para veículos fora de estrada	20	80

Atualmente, o pneu é uma estrutura bem mais complexa, constituída por três tipos de materiais: borracha, têxtil e metal, conforme representado na figura 5.

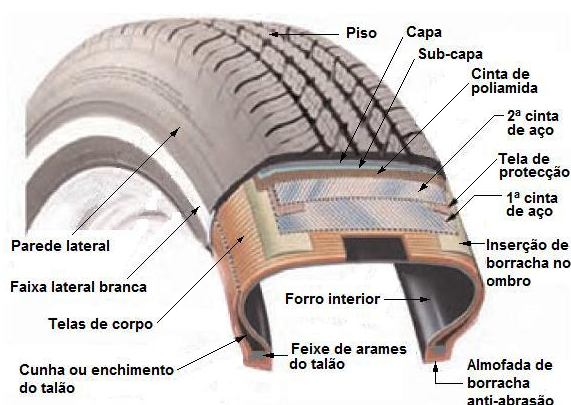


Figura 5 - Estrutura de um pneu (Souza, 2019).

Um pneu de passeio comum é produzido com: borracha natural, borracha sintética, negro de fumo, óxido de zinco, ácido esteárico, sílica, enxofre e cera parafínica. Em proporção total menor do que 10%, tem-se ainda: antidegradantes, aceleradores de vulcanização e retardadores de vulcanização, auxiliares de processo (catalisadores), plastificantes e cargas de reforço.

Todos os anos são gerados milhões de pneus inservíveis, constituindo materiais que chamam à atenção dos ambientalistas e da comunidade acadêmica, porque os pneus não são biodegradáveis, pelo que o acumular de resíduos de borracha tem o potencial de causar problemas ambientais. O processo de vulcanização dificulta a reciclagem e a reutilização dos

componentes originais do pneu. Ainda assim, de acordo com dados sobre a gestão de pneus em fim de vida da Associação Europeia de Fabricantes de Pneus e Borracha, 3,45 milhões de toneladas de pneus em fim de vida (94% dos pneus gerados em 2019 em 32 países da Europa) foram recolhidos e tratados para reciclagem e recuperação de energia (Autoaftermarketnews, 2024). De acordo com Valadares *et al.* (2012), a legislação europeia tem procurado eliminar a situação preocupante da deposição de pneus que se verificava, através de regulamentação específica (Diretiva do Conselho n.º 1999/31/CE), e que proíbe a deposição de pneus usados, inteiros ou triturados, em aterros. Esta norma foi transposta em Portugal, vigorando atualmente legislação nacional que proíbe o depósito de pneus usados em aterros, procurando evitar problemas para o ambiente e saúde pública. A norma também estabelece formas de valorização dos pneus usados, designadamente através de reutilização, recauchutagem, valorização energética e reciclagem.

Atualmente, a aplicação de pneus usados já é muito diversificada, verificando-se que as matérias-primas dos pneus são recursos importantes para indústrias como a construção, automóvel e cimento. Conforme referido por Bravo e de Brito (2012), a reutilização de partículas de borracha de pneus usados é potencialmente positiva para o meio ambiente e, para além disso, a população mundial está progressivamente mais consciente de que uma procura muito alta por recursos naturais é insustentável. Estes fatores levaram, na década de 1990, ao início de estudos sobre betões contendo agregados de borracha de pneus usados.

Ao nível da construção civil têm surgido possibilidades promissoras com expressão no mercado com utilização da borracha de pneus usados, designadamente, em pavimentos asfálticos e desportivos, pisos para recintos infantis, barreiras de impacto em autoestradas e quebra-mares (paredão), elementos de isolamento de calor/som (por exemplo em blocos/telhas leves) (Valadares *et al.*, 2012). A natureza frágil do betão, em comparação com outros materiais, têm motivado o uso de partículas residuais de pneus como agregados do betão para remediar ou reduzir esses atributos negativos (Elchalakani, 2015).

Li *et al.* (1998) concluíram que o betão com borracha demonstrou uma capacidade excelente de isolamento da vibração, sendo que estes resultados indicaram que as misturas podem ser adequadas para aplicações como calçadas ou construções de estradas. Nestas aplicações, a resistência não é uma prioridade sendo desejável uma maior tenacidade e uma redução de vibração (por exemplo, estruturas com isolamento de base e fundações de máquinas). Os autores acrescentam que o betão com borracha apresenta rotura dúctil, indicando que estes materiais podem absorver grandes quantidades de energia plástica e suportar grandes deformações. A rigidez do betão com borracha é inferior à rigidez do betão

normal, justificando-se pela menor rigidez da borracha (menor módulo de elasticidade da borracha) comparativamente à da areia. Através da figura 6, conclui-se que o betão com borracha apresenta maior extensão/deformação quando sujeito a flexão do que o betão normal, indicando que o betão com borracha tem maior flexibilidade na fase elástica, e tem maior ductilidade e absorção de energia na fase plástica, do que o betão convencional.

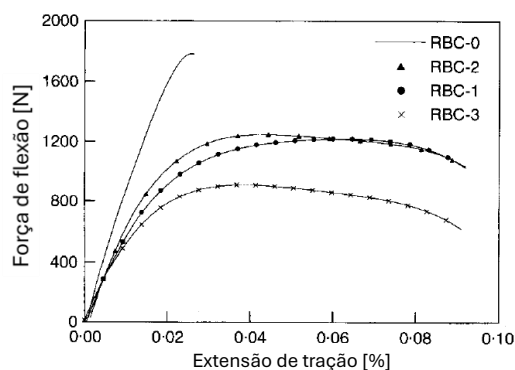


Figura 6 - Extensão do betão normal e com borracha quando sujeitos à flexão, adaptado de Li *et al.* (1998).

Bravo e de Brito (2012) verificaram que os betões com agregados de borracha possuem maior capacidade de amortecimento do que os betões correntes, porque a borracha aumenta a capacidade de absorção de energia resultante do impacto, constatando-se que a deformabilidade e a ductilidade do betão aumentam. Os autores consideram que a utilização de asfalto com borracha em pavimentos reduz a poluição sonora, reduz custos de manutenção e principalmente aumenta o tempo de vida útil do pavimento, aumenta a resistência a variações de temperatura, aumenta a capacidade de drenagem, diminui as fendas através das propriedades elásticas da borracha e garante uma melhor resistência aos ciclos gelo/degelo.

Existem múltiplas investigações científicas que concluem que a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade em betão com borracha diminuem significativamente com o aumento da quantidade de substituição de agregados naturais por borracha. Segundo Elchalakani (2015), os dois mecanismos responsáveis por essa redução geral das propriedades mecânicas são:

- Disparidade significativa entre o módulo de elasticidade dos agregados de borracha e da pasta de cimento, onde as partículas de borracha diminuem a resistência da argamassa devido à baixa rigidez, verificando-se que a borracha funciona quase como vazios, criando zonas de concentração de tensões na pasta;
- Baixo desenvolvimento da zona de transição interfacial (ZTI), onde a natureza hidrofóbica da borracha leva à fraca resistência de aderência entre a superfície da

borracha e a pasta de cimento. A baixa aderência também é atribuída à existência de estearato de zinco, que é usado na formulação de pneus durante a fabricação (vulcanização). Este estearato de zinco migra e difunde-se para a superfície da borracha tornando as partículas hidrofóbicas, criando uma camada de sabão que repele a água e tende a aprisionar bolhas de ar, conforme estudado por Youssf *et al.* (2016) e Mohammadi *et al.* (2016). Uygunoglu e Topcu (2010) observaram que a argamassa de referência sem borracha exibiu aderência completa entre a matriz de cimento e as areias, enquanto que na argamassa com borracha existiam vazios (Pedro *et al.*, 2013).

Elchalakani (2015) refere que os dois mecanismos referidos acima são amplamente interdependentes, uma vez que a fraca ligação na ZTI leva à iniciação e propagação de microfissuras que se desenvolvem ao redor do perímetro das partículas de borracha e, sob carga, as taxas de deformação diferencial entre borracha e pasta de cimento agravam o problema.

A fim de reduzir os efeitos negativos da borracha no desempenho da argamassa, a borracha pode ser modificada previamente para aumentar a sua aderência à pasta de cimento, pelo que foram testados vários métodos de tratamento da borracha (por exemplo, com celulose, com pasta de cimento, etc.). Nesta matéria, muitos estudos mostraram que o tratamento do agregado de borracha com solução de NaOH é economicamente acessível e pode melhorar a aderência entre partículas de borracha e pasta de cimento. Tal deve-se ao facto de o tratamento com solução de NaOH melhorar a hidrofília do agregado de borracha, reduzindo a porosidade entre as partículas de borracha e a pasta de cimento na ZTI (Segre e Joeques, 2000). De acordo com Guo *et al.* (2017), a maior porosidade na ZTI é causada pelo filme de água existente na superfície do agregado durante a hidratação do cimento. A natureza hidrofóbica das partículas de borracha pode levar a um maior ângulo de contacto e ao aparecimento de um filme de água mais espesso, gerando estruturas mais porosas próximas à interface agregado-cimento e reduzindo ainda mais a resistência adesiva. Acresce ainda que o processo de tratamento com NaOH também elimina matérias orgânicas presentes na borracha (óleos, graxas, etc.), devido à contaminação dos pneus usados. O óleo e a sujidade presentes na superfície das partículas de borracha podem formar uma camada indesejada entre a pasta de cimento e a superfície de borracha, o que pode ser uma fonte de defeito na formação de forte aderência entre a superfície de borracha e a pasta de cimento.

De acordo com Youssf *et al.* (2016), o pré-tratamento da borracha utilizando solução de NaOH remove as camadas de estearato de zinco presentes na superfície de borracha dos

pneus como resultado do processo de fabrico, permitindo maior aderência entre a borracha e a matriz de cimento. A solução de NaOH é capaz de eliminar os aditivos na superfície da borracha, deixando vazios na superfície externa da borracha que levam a uma superfície relativamente áspera e porosa, em comparação com a borracha não tratada. Devido ao efeito erosivo desta solução alcalina sobre as partículas de borracha, a superfície destas partículas é “esfarrapada”, o que pode melhorar a resistência à coesão entre as partículas de borracha e o cimento. Além disso, aumenta a hidratação na interface, o que melhora a adesão entre a borracha e o cimento.

Youssf *et al.* (2016) realizaram uma investigação voltada para o período ideal de tratamento das partículas de borracha com NaOH, analisando tratamentos de 0h, 0,5h, 1h e 2h, em argamassas com 20% em volume de substituição de areia por borracha. Assim, a borracha foi pré-tratada com solução de NaOH com concentração de 10%, utilizando diferentes períodos de tratamento. No ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de cura, registou-se um aumento da resistência em 17,3%, 7,5% e 3,6% para as argamassas com borracha tratada durante 0,5 horas, 1 hora e 2 horas, respectivamente, comparativamente com a argamassa com borracha não tratada (figura 7). Os autores concluíram que 0,5 horas de tratamento com a NaOH foi suficiente para maximizar o desempenho do betão com borracha.

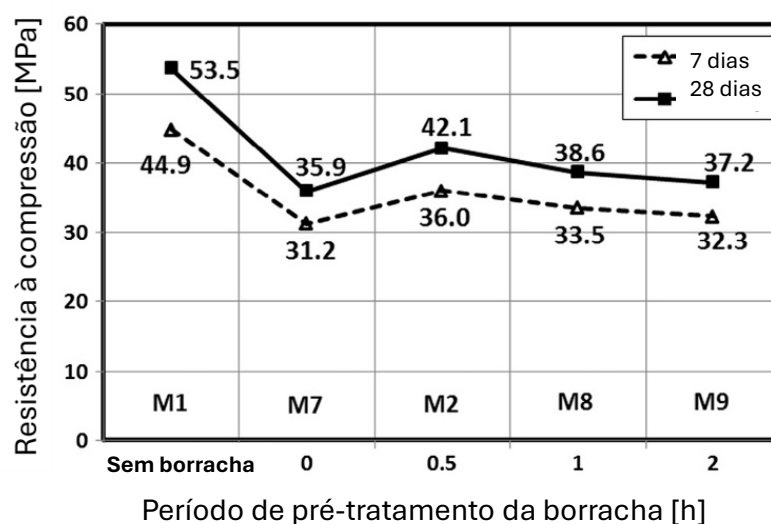


Figura 7 - Resistência à compressão da argamassa aos 7 e 28 dias com variação do período de tratamento da borracha, adaptado de Youssf *et al.* (2016).

Segre e Joeques (2000) afirmam que os resultados das investigações mostram que quanto maior for a concentração de NaOH na solução de tratamento da borracha, maior será a aderência entre a borracha e a matriz de cimento.

Através da revisão da literatura, compilaram-se alguns resultados científicos obtidos em ensaios em argamassas/betões com borracha de pneus usados a substituir agregados naturais, que interessam para este estudo conforme apresentado de seguida.

- Consistência por espalhamento:

Mohammadi *et al.* (2016) analisaram vários estudos que afirmam que a inclusão de borracha na mistura de betão resulta numa redução da trabalhabilidade. A diminuição da trabalhabilidade é consistente com o aumento do teor de borracha, uma vez que as partículas de borracha aumentam a viscosidade da mistura. Valadares *et al.* (2012) concluíram que esta situação deve-se ao facto de o resultado do ensaio do cone de Abrams depender da gravidade, sendo que, quanto menor a massa volúmica do betão, menor o abaixamento.

Estes resultados confirmam os resultados obtidos por Correia *et al.* (2010) que, para uma relação água/cimento constante, verificaram que o índice de consistência por espalhamento diminui (pior trabalhabilidade) quando aumenta a quantidade de partículas de borracha vulcanizada nas argamassas (Pedro, 2011).

No mesmo âmbito, Abd-Elaty *et al.* (2022) avaliaram o efeito do teor de borracha em substituição da areia nas propriedades de argamassas de geopolímeros. Verificaram, como tendência geral, que a incorporação de borracha diminui notavelmente a trabalhabilidade da argamassa, sendo que esta redução aumenta com o aumento do teor de borracha. Os autores concluíram também que estes resultados podem ser atribuídos ao facto de a borracha ter uma massa volúmica inferior à da areia, o que reduz a capacidade da mistura de fluir sob o seu peso. Adicionalmente, o aumento do atrito interno das misturas com borracha, resultante da ação dos contornos irregulares das partículas de borracha, também contribui para o resultado obtido.

No entanto, relativamente à consistência por espalhamento das argamassas no estado fresco, Pedro *et al.* (2013) verificaram que, quando se utiliza a mesma quantidade de água, a utilização de borracha na mistura não provoca variações significativas dos valores de espalhamento, sendo que esta tendência também está de acordo com os resultados obtidos por Uygunoglu e Topçu (2010).

Mohammadi *et al.* (2016) concluíram que, para ambas as séries de amostras de betão preparadas com borracha tratada com NaOH e não tratada, os resultados do abaixamento do cone de Abrams das várias misturas foi semelhante, sendo que isso significa que o tratamento da borracha não teve um efeito significativo na trabalhabilidade da mistura.

- Massa volúmica no estado fresco:

Pedro *et al.* (2013) observaram uma redução da massa volúmica com o aumento da quantidade de borracha, devido à menor massa volúmica da borracha comparativamente com a da areia.

Bravo e de Brito (2012) e Valadares *et al.* (2012) observaram que a massa volúmica no estado fresco dos diversos betões estudados é tanto menor quanto maior a percentagem de substituição de agregados naturais por borracha. A diferença nos valores das massas volúmicas assenta principalmente na diferença de massas volúmicas dos agregados naturais e dos agregados de borracha.

- Resistência à compressão e à tração por flexão:

Relativamente às resistências à compressão e à flexão, Pedro *et al.* (2013) verificaram uma diminuição das mesmas à medida que se aumenta a quantidade de borracha nas argamassas, devido à má aderência entre a borracha e a matriz do ligante na ZTI, entre outros fatores, conforme já foi discutido anteriormente.

Mohammadi *et al.* (2016) observaram que a aplicação de borracha tratada com NaOH em betão afetou significativamente a resistência, comparativamente com as misturas com borracha sem tratamento. Os autores concluíram também que a melhoria obtida na resistência com a utilização de tratamento foi mais promissora na resistência à compressão do que na resistência à flexão. Os autores referem que, quando o NaOH entra em contacto com a superfície da borracha, reage com isopreno, estireno-butadieno e outros componentes orgânicos do pneu. Além disso, a sílica no agregado de borracha pode reagir com solução alcalina forte para formar uma reação álcali-sílica, sendo que essas reações tornam a superfície da borracha mais áspera, o que pode resultar em melhores características de aderência entre a borracha e a pasta. Em contraste, os autores relatam que há investigações que referem que o tratamento com hidróxido de sódio pode criar poros nas superfícies das partículas de borracha, onde bolhas de ar podem ser aprisionadas durante a preparação da mistura, sendo que essas bolhas de ar podem permanecer na matriz do ligante e reduzir a resistência do betão.

Abd-Elaty *et al.* (2022) também verificaram que a incorporação de borracha em argamassas geopoliméricas reduz acentuadamente a resistência à compressão, sendo que a dimensão dessa redução é significativamente influenciada pelo teor de borracha. Por sua vez, observou-se uma tendência semelhante na resistência à flexão. A redução da resistência à flexão é atribuída às mesmas causas que reduzem a resistência à compressão, ou seja, a fraca aderência entre a borracha e a matriz e a diferença de rigidez entre o agregado normal e o

agregado de borracha. Os investigadores notaram que, para além de as resistências à compressão e à flexão serem reduzidas, a incorporação de borracha na argamassa geopolimérica tem efeito significativo no modo de rotura. Na figura 8 pode-se observar o modo de rotura da argamassa geopolimérica contendo borracha, verificando-se que é mais dúctil, quando comparado com a rotura frágil apresentada pela argamassa geopolimérica sem borracha. Este resultado confirma o incremento da tenacidade devido à incorporação de borracha. Assim, verificou-se que a incorporação de borracha em argamassas de geopolímeros altera o modo de rotura de frágil para dúctil, o que torna a amostra coesa após o aparecimento da primeira fissura em flexão, principalmente para altas taxas de substituição.



Figura 8 - Modo de rotura da argamassa geopolimérica aos 28 dias, adaptado de Abd-Elaty *et al.* (2022).

- Módulo de elasticidade dinâmico:

Relativamente ao ensaio do módulo de elasticidade dinâmico, Pedro *et al.* (2013) concluem que esta propriedade diminui de forma linear com o aumento da incorporação de borracha, sendo que esta tendência deve-se provavelmente à maior deformabilidade dos agregados de borracha, ao aumento da porosidade das argamassas com agregados de borracha e ao maior teor de ar incorporado. Valadares *et al.* (2012) referem que a borracha apresenta uma rigidez claramente inferior à dos agregados naturais, por isso é presumível que o módulo de elasticidade do betão sofra uma redução tanto maior quanto maior for o teor de substituição de agregado natural por borracha.

Najim e Hall (2010) também verificaram que o módulo de elasticidade dinâmico em argamassas com borracha diminui progressivamente com o aumento da taxa de substituição de agregados e é sempre menor que o módulo de elasticidade da argamassa de referência. Mohammadi *et al.* (2016) observaram que o módulo de elasticidade reduziu 23% com a adição de 20% de borracha, sendo que essa redução foi semelhante para os dois tipos de séries de

betões com borracha tratada com NaOH ou não tratada, tendo concluído que o tratamento da borracha com NaOH não afeta significativamente o módulo de elasticidade.

Pedro *et al.* (2013) registou uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade para os provetes de argamassa com borracha entre os 28 e os 90 dias de idade. Comparando o argamassa de referência com as que incorporam 5%, 10% e 15% de borracha, verifica-se que o módulo de elasticidade medido aos 28 dias diminui 12%, 28% e 32%, respetivamente. Aos 90 dias, as diminuições são de 20%, 33% e 43%, respetivamente. O autor conclui que, apesar de as argamassas com incorporação de agregados de borracha apresentarem piores desempenhos relativamente às argamassas convencionais em certas propriedades, como na resistência à compressão e à tração por flexão (por exemplo, para a substituição de 5%, 10% e 15% por borracha, em comparação com a argamassa de referência, observou-se uma diminuição da resistência à flexão dos 28 dias de 12%, 5% e 21%, respetivamente, e aos 90 dias, as diferenças aumentam para 34%, 19% e 38%), existem alguns benefícios, como a alteração das características de resistência ao choque, conduzindo a argamassas com melhor comportamento ao impacto suportando maior energia sem rotura.

- Absorção de água:

Martins (2008) investigou as características de argamassas de cimento e refere que a cristalização das partículas de cimento, durante as reações de hidratação, origina uma redução do volume dos poros, com ocupação de parte dos vazios existentes. Assim, não surpreende que a formulação que tem menos cimento e mais água apresente uma maior porosidade, apresentando valores mais elevados de absorção de água (por capilaridade e imersão). A porosidade da argamassa é também fortemente condicionada pela evaporação da água da mistura durante o processo de cura. Assim, a quantidade de água a ser utilizada para obter uma boa argamassa deve ser a estritamente necessária para hidratar o cimento e alcançar uma boa trabalhabilidade, com o objetivo de obter uma mistura homogénea e compacta. O teor de cimento confere ao material uma melhor compacidade e contribui para o aumento da rigidez da argamassa.

A capacidade de absorção de água depende da estrutura porosa da argamassa, da forma e dimensão dos poros e da conectividade entre eles. Os resultados da investigação de Uygunoğlu e Topçu (2010) resumidos na figura 9 mostram que, à medida que o número de partículas de borracha e a relação A/P aumentam, a porosidade da pasta e o aprisionamento de ar pelas partículas de borracha também aumentam.

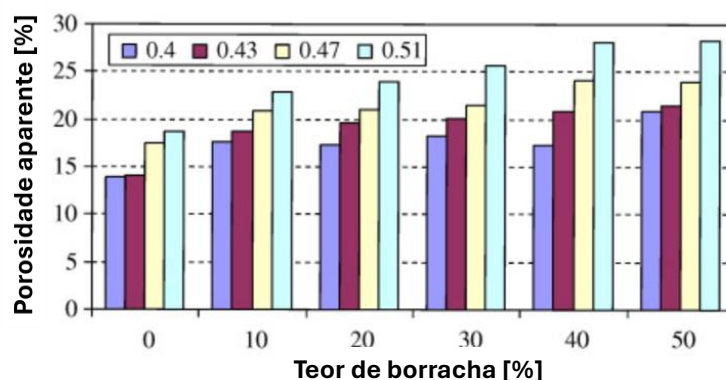


Figura 9 - Efeito do teor de agregados de borracha na porosidade aparente aos 28 dias, adaptado de Uygunoğlu e Topçu (2010).

Turatsinze e Garros (2008) verificaram que o aumento da quantidade de borracha provoca um aumento da porosidade do betão. Por exemplo, verificou-se que a substituição de 25% de agregados naturais por borracha provocou um aumento de 30% da porosidade, comparativamente ao betão de referência, conforme apresentado na tabela 2. Os autores referem que a utilização de borracha resulta em betões com maior porosidade e, consequentemente, com maior absorção de água por imersão (Bravo e de Brito, 2012). Nesta matéria, Uygunoğlu e Topçu (2010) referem que esse comportamento é atribuído à pior compactação obtida devido à diminuição do peso próprio das argamassas com borracha, em comparação com as argamassas de referência. Por outro lado, Bravo e de Brito (2012) relacionam este comportamento ao maior volume de vazios existente entre os agregados de borracha e a pasta cimentícia.

Tabela 2 - Efeito do teor de borracha na porosidade do betão, adaptado de Turatsinze e Garros (2008).

Teor de borracha no betão	SCC0R	SCC10R	SCC15R	SCC20R	SCC25R
Porosidade [%]	13,0	14,1	15,3	16,0	17,4
Peso unitário [kg/m ³]	2296	2052	2008	1973	1927

Pedro *et al.* (2013) constatou uma absorção de água por capilaridade aproximadamente idêntica para as diferentes taxas de substituição de areia por borracha. No entanto, esperava-se um aumento da absorção de água por capilaridade com o aumento da incorporação de borracha, pois este agregado é responsável por uma pior compactação, associada à menor massa volúmica das argamassas. Por outro lado, segundo Khatib e Bayomy (1999), um aumento da quantidade de borracha conduz a um aumento do teor de ar incorporado, sendo assim expectáveis menores valores de absorção de água por capilaridade para maiores taxas de substituição. Pedro *et al.* (2013) conclui que estes dois efeitos contraditórios acabam por se

equilibrar, resultando em curvas de absorção de água por capilaridade ao longo do tempo muito próximas. No respeitante ao coeficiente de capilaridade, nota-se uma variação desprezável para as várias argamassas.

Segre e Joeques (2000) investigaram argamassas de cimento (provetes prismáticos) com 10 % de partículas de borracha de pneu tratadas superficialmente com soluções aquosas saturadas de NaOH por 20 minutos, à temperatura ambiente, com agitação. Relativamente ao ensaio de absorção de água por capilaridade, os autores verificaram que a adição de partículas de borracha diminui a quantidade de água absorvida, uma vez que as partículas de borracha não absorvem água. No entanto, os provetes contendo borracha tratada com NaOH absorvem ainda menos água, indicando melhor adesão destas partículas à matriz.

Bravo e de Brito (2012) verificaram que a porosidade que afeta o fenómeno de absorção por capilaridade não é a mesma que influencia a porosidade por imersão. No primeiro caso, trata-se de porosidade fina que permite gerar diferenças de pressão que fazem com que a água penetre no interior do betão, enquanto que no segundo, são os poros de maiores dimensões que condicionam o volume de água que é absorvido. Martins (2008) defende que a absorção de água por imersão é processada de forma diferente da absorção capilar, sendo que na absorção de água por imersão a água é absorvida em várias direções, ao contrário do que acontece na absorção capilar (apenas na direção vertical). Os resultados obtidos por Bravo e de Brito (2012) parecem indicar que o acréscimo da incorporação de borracha não afeta significativamente a porosidade fina da massa de betão, pelo que verificaram-se valores semelhantes de absorção de água por capilaridade nos vários betões, conforme apresentado na figura 10. Relativamente ao coeficiente de capilaridade, registou-se também uma variação pouco relevante nos vários betões.

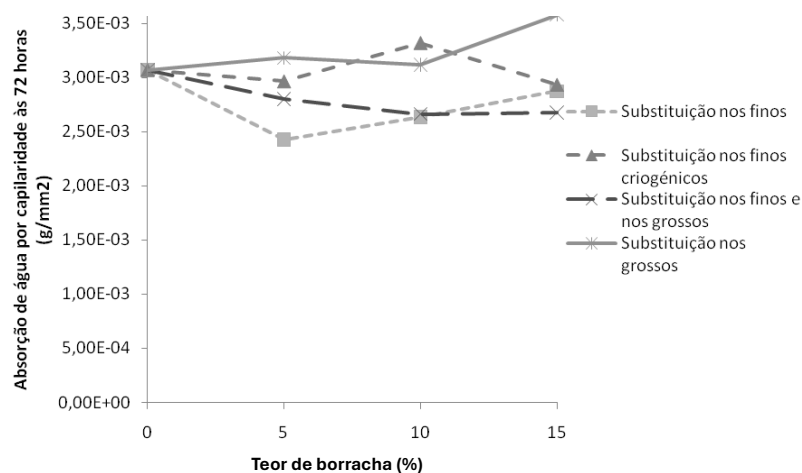


Figura 10 - Absorção de água por capilaridade às 72 horas, em g/mm², para os diversos betões, adaptado de Bravo e de Brito (2012).

- Massa volúmica no estado endurecido:

Quanto ao ensaio de determinação da massa volúmica no estado endurecido, várias investigações verificaram que, com o aumento da taxa de substituição dos agregados naturais por borracha, a massa volúmica da mistura diminui, devido à diferença significativa entre a massa volúmica dos agregados naturais e da borracha (Valadares *et al.*, 2012; Pedro *et al.*, 2013).

Pedro (2011) registou um ligeiro aumento da massa volúmica entre os 28 e 90 dias de idade dos provetes conforme apresentado na figura 11.

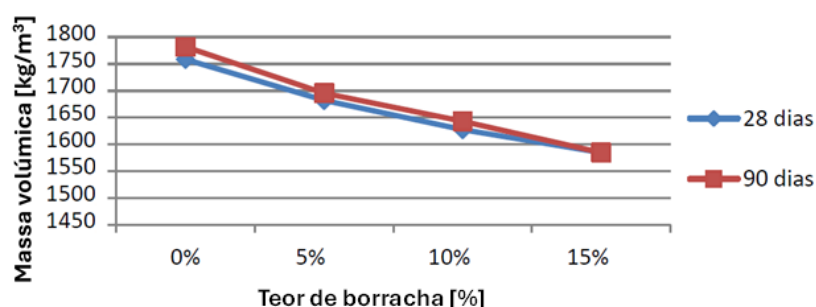


Figura 11 - Massa volúmica aos 28 e aos 90 dias para diferentes tipos de argamassas, adaptado de Pedro (2011).

- Velocidade de propagação de ultrassons:

O teste de velocidade de propagação de ultrassons fornece informações referentes à uniformidade das amostras, cavidades e defeitos (Silva *et al.*, 2022). O ensaio permite avaliar a homogeneidade da estrutura das argamassas, pois quanto mais densa, maiores são os resultados (Carvalho, 2019).

Uygunoğlu e Topçu (2010) observaram que a velocidade de propagação de ultrassons nas argamassas diminuiu com o aumento do teor de borracha. Por exemplo, a velocidade de ultrassons das argamassas com teor de borracha de 50% é cerca de 27-34% menor do que a da mistura de referência. Isto pode ser devido a dificuldades na compactação das misturas contendo maior volume de partículas de borracha, resultando em misturas com maior porosidade e, conseqüentemente, com menor velocidade de ultrassons. Souza (2019) também obteve o mesmo resultado, verificando que a velocidade média de ultrassons diminuiu com o aumento do teor de borracha na argamassa, conforme apresentado na figura 12. O autor justificou o resultado com o aumento da porosidade.

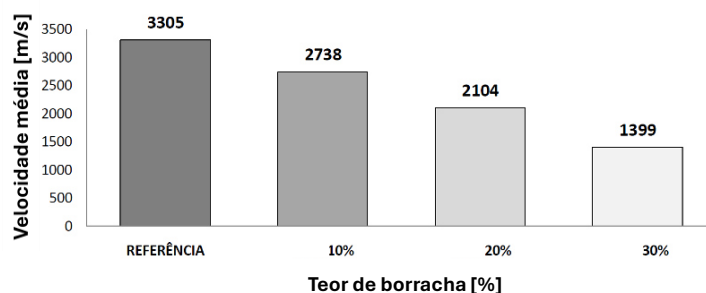


Figura 12 - Média da velocidade de ultrassons em provetes de argamassas de cimento com substituição de areia por borracha, adaptado de Souza (2019).

Najim e Hall (2010) analisaram vários estudos concluindo que o betão com borracha apresenta níveis mais elevados de coeficientes de absorção sonora e de redução do ruído, verificando-se que a velocidade de propagação de ultrassom do betão com borracha diminuiu com o aumento do teor de borracha (figura 13).

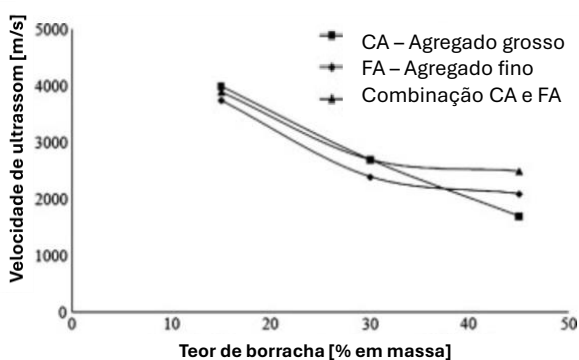


Figura 13 - Efeito do teor de borracha na velocidade de propagação de ultrassom, adaptado de Najim e Hall (2010).

2.4 ARGAMASSAS E BETÕES COM LIGANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE

Neste estudo, as cinzas volantes de baixo teor de cálcio classe F são utilizadas como precursor (fonte de aluminossilicatos) nas argamassas ativadas alcalinamente. As cinzas volantes são um subproduto industrial obtido por precipitação eletrostática ou separação mecânica das poeiras contidas no fumo produzido pela queima de combustível nas centrais termoelétricas a carvão, sendo utilizadas desde há muitos anos no fabrico do betão. O carvão contém impurezas (argila, calcário e quartzo) que fundem durante a combustão e solidificam em pequenas esferas amorfas com dimensões entre 1 e 100 μm , conforme apresentado na figura 14. A composição química das cinzas está essencialmente dependente das

características dos carvões queimados e das impurezas que contenham. De acordo com Coutinho (2006), dada a sua origem nas impurezas minerais contidas no carvão, as cinzas são maioritariamente constituídas por dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), sendo por isso uma interessante fonte de alumínio e silício para geopolímeros. A adição de cinzas volantes no cimento exhibe também atividade pozolânica, reagindo à temperatura normal e em presença de água com o hidróxido de cálcio e com álcalis para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), compostos com capacidade de presa, isto é, que atuam como um cimento.

Em função da sua composição química e da sua atividade pozolânica, as cinzas volantes são classificadas pela norma ASTM C618 (2019) em duas categorias:

- Cinzas volantes da classe F, com um teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ igual ou superior a 50% em massa, sendo que estas cinzas têm baixos teores de CaO, inferiores a 18%, e são provenientes da queima de carvão betuminoso;
- Cinzas volantes da classe C, com um teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ igual ou superior a 50%, com altos teores de CaO (superiores a 18% em massa) e provenientes da queima de carvão sub-betuminoso e lignite.

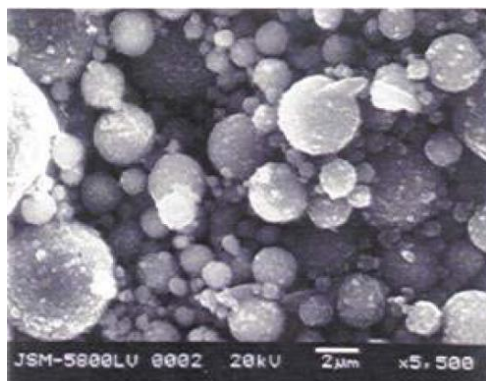


Figura 14 - Partículas de cinza volante ampliadas 5500x (Coutinho, 2006).

Conforme referido, os MAA podem ser agrupados em duas classes principais consoante a quantidade de cálcio (CaO), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3): ligantes ricos em cálcio e ligantes pobres em cálcio. Assim, as cinzas volantes do tipo F, com baixo teor de CaO, são usadas como matéria-prima de aluminossilicatos e representam os MAA com baixo teor de cálcio. Da sua reação com o ativador alcalino com sódio resulta o polímero inorgânico alcalino com estrutura tridimensional N-A-S-H (aluminossilicato de sódio hidratado) ou “geopolímero”, considerado como um precursor de zeólitos. Os produtos alcalinos N-A-S-H e C-(N)-A-S-H (resulta da substituição de Ca^{2+} por Na^+) são formados mais lentamente devido ao processo de cristalização ser mais demorado. Conforme abordado anteriormente, a estrutura

dos géis formados na ativação alcalina de materiais de aluminossilicato com baixo teor de cálcio (com géis do tipo N-A-S-H, tipo “zeólito”) difere substancialmente da estrutura de géis formados na ativação de MAA ricos em cálcio (com géis do tipo C-S-H) (Krivenko, 2017).

A ativação de cinzas volantes é um processo que pode considerar-se como uma zeolitização, em que a última etapa da cristalização não ocorre (ficando o material numa forma amorfa a semi-cristalina) devido às condições experimentais que conduzem a reações muito rápidas na fase de dissolução e condensação mas a reações muito lentas quando o material endurece (Palomo *et al.*, 2004).

O ativador alcalino líquido utilizado neste estudo é a combinação de hidróxido de sódio (NaOH) com silicato de sódio (Na_2SiO_3), sendo este último utilizado como fonte extra de sílica, com relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 1 em massa, e relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{precursor}$ de 13% em massa. Provis e Deventer (2014) concluíram que a mera reação entre a água e MAA (por exemplo, a escória de alto-forno) irá, ao longo de um longo período de tempo, levar à formação de um material endurecido. Verificaram assim que o papel mais importante do ativador alcalino num MAA é o de acelerar a reação para ter lugar dentro de um prazo razoável para a produção na engenharia, sendo que isto é facilmente alcançado pela criação de um pH elevado. Os silicatos e hidróxidos alcalinos criam o pH mais elevado entre os ativadores comuns.

Para Criado *et al.* (2005) a ativação de cinzas é um processo diferente da hidratação do cimento Portland, mas muito semelhante aos princípios químicos envolvidos na síntese de um vasto grupo de zeólitos, sendo o principal produto de reação um gel aluminossilicato alcalino. Este produto envolve a coordenação tetraédrica da sílica e da alumina, em cadeias poliméricas em que os Al^{3+} substituem os Si^{4+} e em que a carga negativa electrostática é compensada por catiões alcalinos. Em resultado do ataque alcalino de materiais aluminossilicatos, origina-se uma primeira fase de nucleação onde os aluminossilicatos são dissolvidos e uma segunda fase onde os núcleos atingem um determinado tamanho crítico e começam a cristalizar. Contudo, devido à rapidez da reação, a cristalização só pode ocorrer a longo prazo (figuras 15 e 16).

No caso do precursor tratar-se de cinzas volantes, Torgal e Jalali (2009) verificaram que tem lugar uma fase de dissolução, na qual se quebram as ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Al. Os produtos gerados durante a fase de destruição da estrutura das cinzas vão acumulando-se (indução). Finalmente, dá-se a condensação e capacidade ligante do material, numa estrutura fracamente ordenada mas com resistências elevadas.

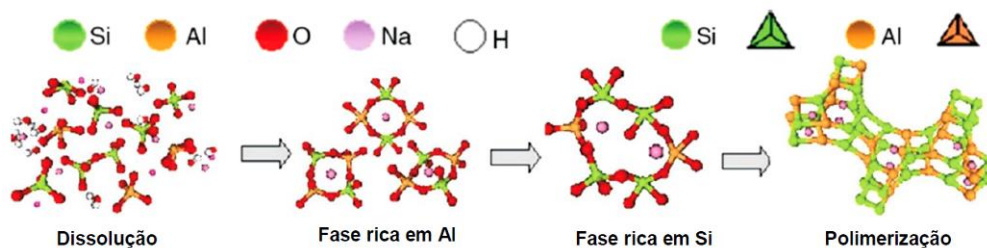


Figura 15 - Modelo da formação do gel N-A-S-H, adaptado de Krivenko (2017).

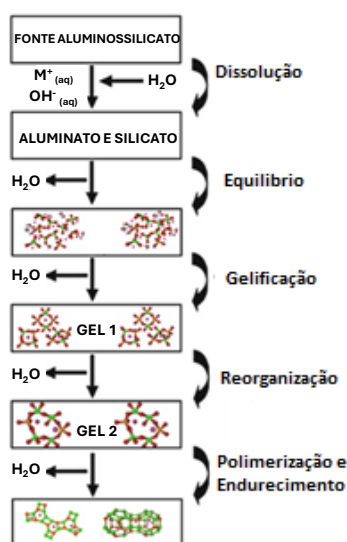


Figura 16 - Modelo conceitual da ativação de aluminossilicato com hidróxido, adaptado de Provis e Deventer (2014).

Conforme descrito em Carvalho (2019), as cinzas volantes são um material que tem vindo a ser estudado por vários investigadores como ligante ativado alcalinamente, devido à sua composição química (o dióxido de silício SiO_2 pode constituir maior parte da cinza) e morfologia (as partículas da cinza são esferas perfeitas). Os conhecimentos adquiridos com as várias investigações permitiu definir um modelo da ativação alcalina destas cinzas.

Fernández-Jiménez *et al.* (2005), com a experiência obtida, identificam várias etapas na ativação da cinza volante. O processo começa com o ataque químico na superfície de uma partícula de cinza volante devido ao elevado pH da solução alcalina, iniciando a dissolução dos aluminossilicatos (figura 17 a)). A figura 17 b) corresponde ao desenvolvimento da reação na superfície da partícula, aumentando a abertura e expondo as partículas esféricas de menor dimensão que se encontram no interior ao ataque alcalino. A entrada da solução alcalina no interior da partícula produz produtos de reação dentro da casca da esfera, em simultâneo com as reações que continuam a acontecer de fora para dentro, formando uma matriz densa. O processo da dissolução da partícula termina quando esta estiver quase toda ou toda dissolvida pelo ativador alcalino (figura 17 c)). A formação dos produtos de reação dentro das esferas

pode servir como barreira entre a solução e certas partes das partículas menores, impedindo a dissolução por completo destas (figura 17 e)). Por fim, observando a figura 17 d), a pasta obtida pode conter partículas completamente dissolvidas, partículas que mantêm a sua forma esférica depois de atacadas pelo ativador alcalino e partículas que não reagiram. Assim, o processo de ataque à casca vítrea de uma partícula de cinza esférica parcialmente oca pelo ativador de hidróxido leva à formação de produtos de reação tanto no exterior como no interior da partícula, conduzindo a uma microestrutura final que contém partículas de cinzas volantes incorporadas com diferentes graus de reação, conforme estudado em Provis e Deventer (2014).

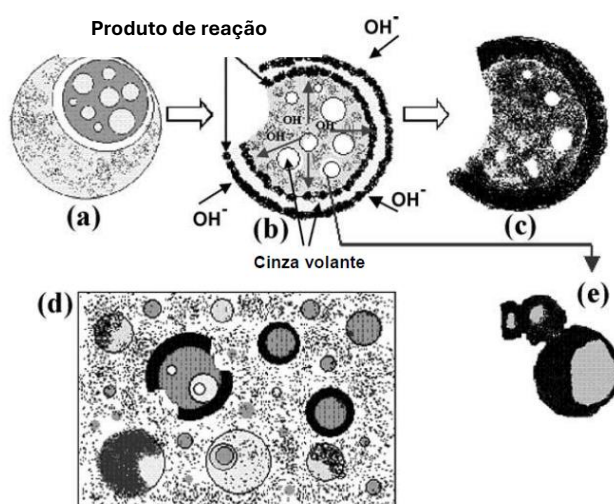
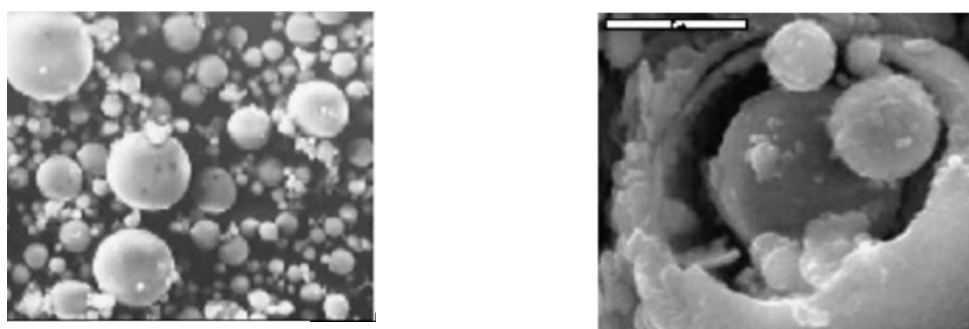


Figura 17 - Ação do ativador alcalino nas cinzas volantes, adaptado de Fernández-Jiménez *et al.*, (2005).

Segundo Fernandez-Jimenez *et al.* (2005), as cinzas volantes postas em contacto com uma solução alcalina de elevado pH iniciam um processo de dissolução da Al e Si. Seguidamente as moléculas maiores precipitam num gel (polimerização e nucleação) e o ataque alcalino abre as esferas de cinza, expondo pequenas esferas no seu interior, que são por sua vez sujeitas ao ataque alcalino, até que a esfera esteja quase ou totalmente dissolvida, gerando-se produtos de reação no seu interior e exterior (figura 18).



a) Esferas de cinza original.

b) Cinzas ativadas com solução de NaOH.

Figura 18 - Microestrutura da ativação alcalina de cinzas volantes (Fernandez-Jimenez *et al.*, 2005).

Através da revisão da literatura, compilou-se alguns resultados científicos obtidos nos ensaios em estudo, comparando os resultados obtidos com argamassas/betões de cimento (AC) e argamassas ativadas alcalinamente com cinzas volantes (AAA), conforme apresentado de seguida.

- Consistência por espalhamento:

Carvalho (2019) comparou o espalhamento de AC com AAA com cinza volante. O autor variou a relação água/ligante das misturas para se obter um espalhamento de 200 ± 20 mm, tendo obtido relações água/ligante de 0,50 e 0,36 para a AC e a AAA, respetivamente, conforme resultados apresentados na tabela 3. A diferença de espalhamentos foi elevada de 36,3 mm, pelo que a relação água/ligante de AAA devia ser superior para aproximar os valores dos espalhamentos, com impacto nos resultados dos restantes ensaios.

Tabela 3 - Relação água / ligante e resultados do espalhamento, adaptado de Carvalho (2019).

Argamassa	Relação água/ligante	Espalhamento (mm)
AC	0,50	222,8
AAA	0,36	186,5

- Massa volúmica no estado fresco:

Carvalho (2019) efetuou o ensaio de massa volúmica no estado fresco com AC e AAA com cinzas volantes, ambas com relação líquido/ligante de 0,50 e obteve massas volúmicas idênticas, conforme resultados apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Massa volúmica das argamassas no estado fresco, adaptado de Carvalho (2019).

Argamassa	Massa Volúmica (kg/m^3)
AC	2246,8
AAA	2246,9

- Resistências à compressão e à tração por flexão:

Carvalho (2019) efetuou o ensaio de tração por flexão em argamassas de cimento CEM I 42,5R e argamassas ativadas alcalinamente com cinzas volantes e verificou um aumento dos 7 para os 28 dias, conforme resultados apresentados na tabela 5. No entanto, a evolução da resistência entre as duas idades dos provetes de AAA foi bastante superior à dos provetes de AC, podendo-se concluir que a lentidão do processo de polimerização faz com que o

desenvolvimento da resistência se prolongue no tempo para além dos 28 dias, mesmo depois da cura térmica. As condições de cura das argamassas ativadas alcalinamente, até aos 28 dias, foram as seguintes: no primeiro dia, os provetes encontravam-se dentro dos moldes com uma película de plástico por cima, à temperatura ambiente do laboratório; no segundo dia, o molde foi colocado dentro da estufa a 70 °C; ao terceiro dia, os provetes foram descofrados e transportados para a câmara seca, a 20 °C e $55 \pm 5\%$ de humidade relativa.

Tabela 5 - Resistência à flexão dos provetes de AC e AAA, adaptado de Carvalho (2019).

Argamassa	Resistência à Flexão (MPa)	
	7º Dia	28º Dia
AC	5,35	6,89
AAA	4,19	8,52

O autor comparou também a resistência à compressão das duas argamassas, sendo que os resultados mostram o mesmo pendor positivo para a resistência à compressão dos 7 para os 28 dias, com o cimento a apresentar maiores valores, mas as AAA a originar uma maior evolução dos 7 para os 28 dias, conforme resultados apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Resistência à compressão dos provetes de AC e AAA, adaptado de Carvalho (2019).

Argamassa	Resistência à Compressão (MPa)	
	7º Dia	28º Dia
AC	43,92	55,15
AAA	17,02	29,99

- Módulo de elasticidade dinâmico:

Carvalho (2019) efetuou o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico e verificou que existe um aumento do módulo com a idade das argamassas, sendo que AC apresentam valores de módulo de elasticidade superiores aos das AAA, conforme resultados apresentados na tabela 7. Os provetes de cimento não têm a maior taxa de desenvolvimento, pois, dos 7 para os 28 dias, o módulo de elasticidade dinâmico aumentou cerca de 7%, enquanto o das AAA cresceu mais de 35%.

Tabela 7 - Módulo de elasticidade dinâmico de AC e AAA, adaptado de Carvalho (2019).

Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)		
Argamassa	7º Dia	28º Dia
AC	34,93	37,37
AAA	16,86	22,82

- Massa volúmica no estado endurecido:

Carvalho (2019) efetuou o ensaio de massa volúmica no estado endurecido das AC e das AAA, e verificou que os valores obtidos para os provetes de cimento são superiores aos valores das AAA, não existindo grande variação dos valores com a evolução da idade das argamassas, conforme resultados apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Massa volúmica aparente da AC e AAA, adaptado de Carvalho (2019).

Massa Volúmica Aparente (kg/m ³)		
Argamassa	7º Dia	28º Dia
AC	2231,4	2245,9
AAA	2084,4	2047,7

- Absorção de água por capilaridade:

O coeficiente capilar (C.C.) traduz a velocidade com que a absorção é processada nos momentos iniciais, enquanto o valor assintótico (V.A.) da curva de absorção por capilaridade permite quantificar a quantidade total de água que, por unidade de superfície, penetra na argamassa. A velocidade de absorção inicial depende, essencialmente, do tamanho dos poros (sendo superior em argamassas com maior tamanho de poros) e a quantidade total de água absorvida depende da porosidade, sendo tanto maior quanto maior for a porosidade da argamassa. Assim pode-se afirmar que existe maior absorção capilar, quanto maior for a velocidade inicial de absorção de água e maior for a quantidade total de água absorvida. O autor também concluiu que a velocidade de absorção capilar diminui e a quantidade de água total absorvida diminui com a evolução da idade em argamassas de cimento.

Martins (2008) verificou que a redução da relação A/P em argamassas de cimento permite a formação de uma estrutura menos porosa. Panizza *et al.* (2018) confirmaram uma tendência geral de diminuição da resistência à compressão com o aumento da porosidade da amostra devido à maior relação A/P em betões.

- Velocidade de propagação de ultrassons:

Neves (2022) concluiu que existe uma relação linear entre a velocidade de propagação de ultrassons e a resistência à compressão dos betões produzidos.

Martins (2008) também defende que a velocidade dos ultrassons apresenta uma boa correlação com a resistência mecânica do material, pelo que a velocidade dos ultrassons das argamassas aumenta com o aumento da resistência mecânica do material à medida que aumenta a idade da argamassa. No entanto, caso esta regra não se verifique é porque, para além da evolução da hidratação do cimento e do endurecimento da argamassa ao longo do tempo (com o esperado aumento da resistência mecânica e diminuição da porosidade), a evolução da retração pode originar o aparecimento de fissuras na estrutura interna das argamassas, sendo responsáveis pela redução da velocidade das ondas (devido à criação de descontinuidades).

Suescum-Morales *et al.* (2022) estudaram AAA com cinzas volantes e verificaram que a velocidade de propagação de ultrassons aumentou com o aumento da idade da amostra. No entanto, esse aumento foi muito pequeno ou quase inexistente entre os 7 e 14 dias de idade, mas elevado entre 14 dias e 28 dias, sendo possível que, além da catálise inicial provocada pela etapa de termocura, a reação de dissolução e polimerização em curso possa ter sido mais relevante durante esse período.

Carvalho (2019) efetuou o ensaio de velocidade de propagação de ultrassons em AC e em AAA com cinzas volantes, tendo verificado que AC apresenta resultados maiores em 29,7% (28.º dia) que as AAA, sendo isso expectável de acordo com os resultados do módulo de elasticidade dinâmico, conforme apresentado na tabela 9. O aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos 7 para os 28 dias reflete a evolução da matriz das argamassas, com as AAA a manifestarem maior progresso do que as de argamassas de cimento (14,7 e 11,1%, respetivamente), o que justifica a evolução registada no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico. No entanto, as argamassas de cimento apresentam sempre maior velocidade de propagação de ultrassons, comparativamente com as AAA com cinzas volantes.

Tabela 9 - Velocidade de propagação dos ultrassons, adaptado de Carvalho (2019).

Argamassa	Velocidade de Propagação de Ultrassons (m/s)	
	7º Dia	28º Dia
AC	4125,9	4586,4
AAA	3085,2	3537,2

3

CAMPANHA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são estabelecidas as diferentes fases da campanha experimental e procede-se à definição dos constituintes, composições, métodos de produção e processos de moldagem e cura dos provetes de cada argamassa. Também são descritos os ensaios realizados durante a campanha experimental.

3.1 PLANO EXPERIMENTAL

A campanha experimental foi organizada em duas fases. A primeira fase do trabalho laboratorial iniciou-se com a caracterização (baridade, distribuição granulométrica, absorção de água e massa volúmica) dos materiais (cimento, cinza volante, areias e agregados de borracha) e com a produção de misturas preliminares das argamassas de referência (de cimento e de cinza volante) sem agregados de borracha reciclados, com o intuito de determinar as relações A/P que conduzem a um espalhamento de 150 ± 10 mm.

Numa segunda fase, foram produzidos 6 provetes prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm) de cada uma das seguintes misturas de argamassa (já tendo em consideração as relações A/P adequadas):

- Argamassa de referência de cimento (ARC);
- Argamassa de referência ativada alcalinamente (ARAA);
- Argamassas de cimento com 5, 10 e 20% de substituição de areia por agregados de borracha (A#C, com # igual a 5, 10 ou 20);
- Argamassas ativadas alcalinamente com 5, 10 e 20% de substituição de areia por agregados de borracha (A#AA, com # igual a 5, 10 ou 20);
- Argamassas de cimento com 5, 10 e 20% de substituição de areia por agregados de borracha tratada com NaOH (A#C - T, com # igual a 5, 10 ou 20);

- Argamassas ativadas alcalinamente com 5, 10 e 20% de substituição de areia por agregados de borracha tratada com NaOH (A#AA - T, com # igual a 5, 10 ou 20).

No estado fresco das argamassas foram realizados os ensaios de consistência por espalhamento e massa volúmica. No estado endurecido, as argamassas produzidas foram alvo de caracterização mecânica e física aos 28 e 56 dias. Para se proceder a uma avaliação do desempenho mecânico das argamassas foram conduzidos os seguintes ensaios: (i) resistência à tração (por flexão) e à compressão e (ii) módulo de elasticidade dinâmico (este último ensaio foi realizado no Instituto Superior Técnico). Para uma completa caracterização física das argamassas, realizaram-se os seguintes ensaios: (i) porosidade aberta e massa volúmica, (ii) absorção de água por imersão, (iii) absorção de água por capilaridade e (iv) velocidade de propagação de ultrassons.

3.2 CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

Pela definição apresentada na norma NP EN 998-1 (2013), a argamassa é uma mistura de um ou mais ligantes inorgânicos, agregados, água e por vezes aditivos e/ou adjuvantes. Nesta investigação, cada argamassa tem um material como ligante (cimento ou cinzas volantes) e, nas argamassas ativadas alcalinamente, os líquidos incluem, para além da água, a solução alcalina de hidróxido de sódio combinada com silicato de sódio.

Nas secções que se seguem, são descritos sucintamente os vários constituintes das argamassas formuladas nesta pesquisa.

3.2.1 ÁGUA

A água potável da torneira utilizada na produção das argamassas é proveniente da rede pública do município do Barreiro, em conformidade com a Diretiva 98/83/CE.

A quantidade de água utilizada na amassadura foi definida em função da consistência pretendida. Assim, a quantidade de água necessária para as argamassas, ou seja, a relação A/P utilizada nas misturas, foi determinada experimentalmente através da verificação de um espalhamento de 150 ± 10 mm nas argamassas de referência. Foi definido este valor de espalhamento por corresponder a uma trabalhabilidade adequada para as argamassas em estudo.

Nas argamassas produzidas, a quantidade de água total utilizada foi definida tendo em consideração a relação A/P e a água absorvida pelo agregado. Nas argamassas ativadas alcalinamente, a quantidade de água necessária foi definida descontando a água incluída na

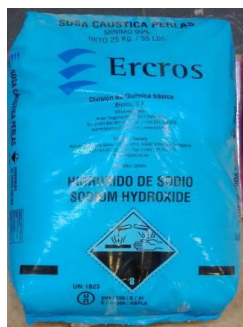
solução de silicato de sódio. Neto (2021) refere que, na ativação alcalina, a água afeta a formação, estrutura e propriedades dos geopolímeros, pois a água fornece meio para a dissolução, transporte dos íons dissolvidos, hidrólise e policondensação. Assim, a relação A/P é importante porque afeta diretamente a trabalhabilidade, dissolução, reação de geopolimerização e, conseqüentemente, a resistência do produto final (mistura homogênea), sendo que o excesso de água é indesejável porque dilui a alcalinidade do sistema, dificultando o progresso da geopolimerização.

3.2.2 ATIVADORES ALCALINOS

Para a produção do ativador alcalino nas AAA foi feita a combinação de granulado de hidróxido de sódio com solução de silicato de sódio, sendo que na determinação da composição da argamassa foi utilizada uma relação Na_2O /precursor de 13% e a razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ em massa igual a 1. Estas proporções foram definidas após análise da revisão da literatura. A escolha dos ativador alcalino deveu-se ao baixo custo do hidróxido de sódio e a sua capacidade para aumentar o pH da mistura e, por outro lado, o silicato de sódio fornece SiO_2 extra que é necessária à condensação da estrutura.

O hidróxido de sódio (ou soda cáustica) também foi utilizado para o pré-tratamento das partículas de borracha e tem um grau de pureza química, no mínimo, de 99% e uma massa volúmica de 2130 kg/m^3 , sendo que o produto encontrava-se no estado sólido em forma de pérolas e foi produzido pela empresa “Ercros, S.A.” (Suescum-Morales *et al.*, 2022) (figura 19 a) e b)). Sempre que a embalagem de hidróxido de sódio era aberta para se retirar o produto, a embalagem era logo novamente fechada com fita adesiva, com o objetivo de evitar a alteração da concentração real do produto, quando em contacto com a humidade. As soluções com hidróxidos apresentam três propriedades importantes na sua fase de produção: são bastante corrosivas, têm maior viscosidade do que a água e libertam calor devido à dissolução do hidróxido alcalino na água.

O silicato de sódio (Na_2SiO_3) encontrava-se no estado líquido numa solução com massa volúmica de 1370 kg/m^3 e concentrações em SiO_2 de 28%, Na_2O de 8% e H_2O de 64% (Suescum-Morales *et al.*, 2022) (figura 19 c)).



a) Embalagem de NaOH.



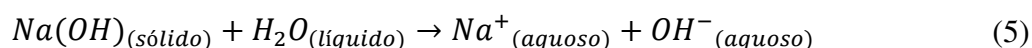
b) Amostra de NaOH.



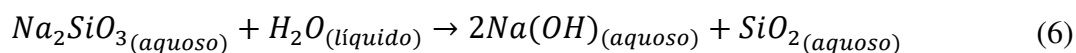
c) Silicato de sódio.

Figura 19 - Ativadores alcalinos utilizados na campanha experimental.

Analisando a interação entre os produtos utilizados para a ativação alcalina, ou seja, a água, o NaOH e o Na_2SiO_3 , verifica-se que, quando o hidróxido de sódio se dissolve em água, este separa-se entre cátions sódio (Na^+) e ânions hidróxido (OH^-), conforme reação descrita na equação (5), gerando calor durante essa dissociação. Quanto maior a concentração de NaOH adicionada à solução, maior a libertação de calor.



Quanto à dissolução do silicato de sódio (em fase aquosa) em água, esta possibilita a formação de hidróxido de sódio e de sílica (SiO_2), como mostra a equação (6).



Com isto, a relação entre $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ presente na solução alcalina desempenha um papel importante na própria solução alcalina e, mais à frente, no processo de polimerização, conforme estudado por Neves (2022).

De acordo com algumas investigações, a solução Na_2SiO_3 , o NaOH e a água são misturados 24 horas antes da produção da argamassa para evitar catálise de polimerização devido à natureza exotérmica do ativador, conforme defendido por Suescum-Morales *et al.* (2022) e Panizza *et al.* (2018). Na presente dissertação, optou-se por preparar a solução alcalina durante o início da produção das argamassas, misturando a solução de NaOH e de Na_2SiO_3 com a água, de forma a evitar o processo de gelificação e precipitação da solução alcalina de NaOH e Na_2SiO_3 que ocorre quando esta mistura é preparada 24 horas antes da sua aplicação. É importante salientar que esta alteração de processo relativamente à literatura

poderá ter repercussões na microestrutura das argamassas devido ao elevado calor libertado pela preparação da solução no momento da mistura, o que pode afetar as suas propriedades mecânicas e de durabilidade, conforme investigado por Neves (2022).

3.2.3 AGREGADOS NATURAIS

As areias de quartzo, quartzito e feldspato utilizadas na investigação têm duas granulometrias distintas, designando-se por areia fina (AF) e areia grossa (AG). Ambas as areias estavam disponíveis no Laboratório de Engenharia Civil da ESTBarreiro e foram fornecidas pelo Grupo SOARVAMIL. A areia fina apresentava dimensão entre 0 mm e 2 mm e a areia grossa entre 0 mm e 4 mm, sendo que se considerou uma massa volúmica das areias de 2630 kg/m^3 , uma absorção de água de 0,4% e 0,5%, respectivamente, e uma absorção de água aos 10 minutos de 50% e 60%, respetivamente (Suescum-Morales *et al.*, 2022) (figura 20). As distribuições granulométricas das areias são apresentadas nas fichas técnicas dos produtos, pelo que foram consideradas neste estudo (Anexos C e D).



Figura 20 - Amostras de areia fina (direita) e areia grossa (esquerda).

3.2.4 AGREGADOS RECICLADOS DE BORRACHA

Toda a borracha utilizada na substituição das areias das argamassas foi obtida através da trituração de pneus usados através de processo mecânico e depois foi peneirada e separada em três granulometrias com partículas de 0 mm a 1 mm, de 1 mm a 2 mm e de 2 mm a 4 mm, para garantir uma distribuição granulométrica semelhante à das areias (figura 21). A massa volúmica da borracha foi considerada com um valor médio de 1100 kg/m^3 (Bravo e de Brito,

2012; Duarte et al., 2016; Khaloo et al., 2008; Cairns et al., 2004; Turatsinze et al., 2007 e Bignozzi e Sandrolini, 2006).

Assim, a borracha que foi utilizada na substituição de 5, 10 e 20% do volume da areia foi dividida nas três granulometrias (0-1 mm, 1-2 mm e 2-4 mm), sendo que a massa de borracha de cada granulometria será calculada de acordo com a percentagem de areia existente na argamassa de referência em cada uma dessas granulometrias, conforme descrito em 3.4.1 e 3.4.2.



Figura 21 - Três amostras de borracha: 0-1 mm (esquerda), 1-2 mm (centro) e 2-4 mm (direita).

Neste estudo, realizaram-se ensaios de argamassas com substituição em volume de 5, 10 e 20% de borracha pré-tratada em solução saturada de NaOH, para posteriormente comparar com os resultados dos ensaios das mesmas argamassas com borracha sem tratamento.

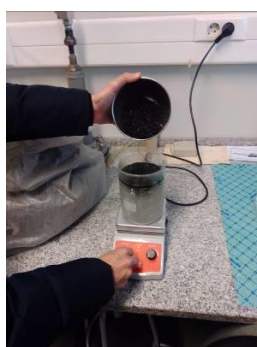
Tendo em consideração a revisão da literatura efetuada no capítulo 2, os procedimentos adotados para o tratamento da borracha com NaOH foram os seguintes:

- Preparar a solução alcalina saturada juntando 800 gramas de água e 400 gramas de NaOH num gobelé com volume de 1 dm³ e, posteriormente, agitar a solução com vareta de vidro até dissolver completamente o NaOH (figura 22 a));
- Colocar o gobelé com a solução alcalina no agitador magnético e ligar o agitador;
- Juntar 100 a 120 gramas de borracha de uma dada granulometria (0-1 mm, 1-2 mm ou 2-4 mm) na solução alcalina e agitar com vareta de vidro até submersão total da borracha (figura 22 b));
- Deixar a mistura no agitador magnético durante o tempo do tratamento (30 minutos), procedendo-se também à agitação manual com vareta de vidro de 5 em 5 minutos (figura 22 c));

- Passados 30 minutos, desligar o agitador magnético e verter a mistura num peneiro com malha de 75 micrómetros, procedendo-se à filtragem da borracha no peneiro e escorrimento da solução alcalina no lavatório (figura 22 d));
- Medir o pH da água limpa da torneira utilizando o teste rápido e depois lavar a borracha dentro do peneiro com água da torneira durante 5 minutos (figura 22 e));
- Ao fim de 5 minutos de lavagem, medir o pH da água residual da lavagem para confirmar se o pH já não tem influência do NaOH. Caso negativo, continuar o procedimento de lavagem até a neutralização do pH da água residual (figura 22 f));
- Finalmente, retirar a borracha tratada do peneiro e espalhar num tabuleiro, sendo colocada a secar ao ar na temperatura ambiente, durante cinco dias, para posteriormente ser incorporada nas argamassas (figura 22 g));
- Repetir estes procedimentos várias vezes até se perfazer a quantidade total de borracha tratada necessária para a produção de todas as argamassas.



a) Preparação da solução de NaOH.



b) Mistura da borracha na solução de NaOH.



c) Agitação da mistura.



d) Colocação da borracha no peneiro.



e) Lavagem da borracha.



f) Teste rápido de pH da água.



g) Borracha no tabuleiro ao ar.

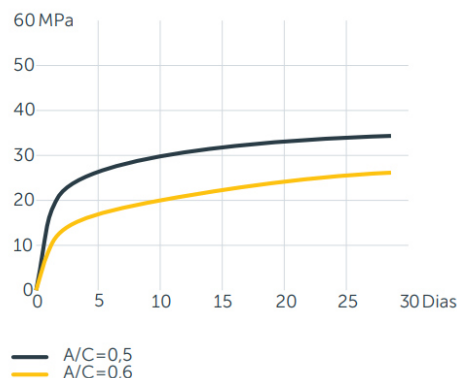
Figura 22 - Procedimentos do tratamento da borracha em solução de NaOH.

3.2.5 CIMENTO

Nas argamassas de cimento foi utilizado cimento do tipo CEM II/B-L 32,5 N produzido na “Secil”, sendo este um cimento Portland Composto, conforme previsto na NP EN 197-1

(2012), com 21-35%, em massa, de calcário, com resistência à compressão aos 28 dias de 32,5 MPa e de resistência normal às primeiras idades (figura 23 a)).

A massa volúmica do cimento é 3100 kg/m^3 . A ficha técnica apresenta os valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 kg/m^3 de cimento CEM II/B-L 32,5 N, verificando-se a diminuição da resistência à medida que aumenta a relação água/cimento (A/C), conforme figura 23 b).



a) Embalagem de 25 kg de cimento.

b) Resistência à compressão de CEM II/B-L 32,5 N.

Figura 23 - Embalagem e valores da resistência à compressão do betão com cimento CEM II/B-L 32,5 N.

3.2.6 CINZAS VOLANTES

A cinza volante de carvão de classe F (figura 24), fornecida pela EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. na Central de Sines, foi utilizada como ligante com massa volúmica igual a $2300 \pm 200 \text{ kg/m}^3$ e quantidade total de CaO inferior a 10%, conforme constante na Declaração de Desempenho 0856-CPR-0402 (Anexo B). Assim, a massa volúmica considerada foi de 2431 kg/m^3 , conforme apresentado na literatura (Suescum-Morales *et al.* (2022); Neves (2022)), relativamente a cinzas volantes da Central de Sines e da “Secil”.



Figura 24 - Amostra de cinzas volantes.

3.2.7 ADJUVANTES

O superplastificante SikaPlast-717 foi incorporado na composição das argamassas com a função de dispersante de partículas e redutor de água, o que garantiu a trabalhabilidade desejada das argamassas sem aumentar o teor de água da mistura, facilitando o processo de mistura. Este superplastificante é constituído por uma combinação de dispersantes orgânicos sintéticos à base de naftaleno em meio aquoso, com massa volúmica de $1,21 \pm 0,03 \text{ kg/dm}^3$ e pH de 10 ± 1 (Suescum-Morales *et al.*, 2022). Neste estudo, considerou-se uma dosagem de 0,2 % sobre a massa do precursor (figura 25).

A escolha deste superplastificante deveu-se à adequação para utilização em argamassas de cimento conforme resulta da análise da ficha técnica e, por outro lado, é um superplastificante com um pH suficientemente elevado para introdução numa solução com ativador alcalino.



a) Embalagem do superplastificante.



b) Amostra do superplastificante.

Figura 25 - Superplastificante SikaPlast-717 utilizado na produção das argamassas.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Na campanha experimental foram definidas catorze formulações de argamassas distintas. Assim, resultaram duas argamassas de referência, uma de cimento (ARC) e uma de cinzas volantes (ARAA), quatro argamassas com substituição de 5% de areia por borracha, duas de cimento (A5C e A5C-T) e duas de cinzas volantes (A5AA e A5AA-T), quatro argamassas com substituição de 10% de areia por borracha, duas de cimento (A10C e A10C-T) e duas de cinzas volantes (A10AA e A10AA-T), e quatro argamassas com substituição de 20% de areia por borracha, duas de cimento (A20C e A20C-T) e duas de cinzas volantes (A20AA e A20AA-T). Na tabela 10, identificam-se as várias argamassas formuladas.

Tabela 10 - Identificação (ID) das argamassas formuladas.

ID Argamassa	Ligante	% de substituição de areia por borracha	Tratamento da borracha com NaOH
ARC	Cimento	0%	-
ARAA	C. Volantes	0%	-
A5C	Cimento	5%	Não
A5AA	C. Volantes	5%	Não
A5C-T	Cimento	5%	Sim
A5AA-T	C. Volantes	5%	Sim
A10C	Cimento	10%	Não
A10AA	C. Volantes	10%	Não
A10C-T	Cimento	10%	Sim
A10AA-T	C. Volantes	10%	Sim
A20C	Cimento	20%	Não
A20AA	C. Volantes	20%	Não
A20C-T	Cimento	20%	Sim
A20AA-T	C. Volantes	20%	Sim

3.4 COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS

A determinação da composição das diferentes argamassas seguiu o método das curvas de referência de Faury que permite definir a melhor proporção de cada um dos componentes sólidos da argamassa, de modo que a curva granulométrica daí resultante (curva real) se aproxime da curva de referência. Deste modo, nesta investigação, formulou-se a curva de referência de Faury para determinar a quantidade ponderada de cada um dos agregados, areia fina e areia grossa, na composição final da argamassa.

A curva de referência de Faury define-se por três pontos, que formam 2 segmentos de reta. No eixo das abcissas, representa-se as dimensões das aberturas dos peneiros, que vão de 0,0065 mm até 4 mm ($D_{\max}$) em uma escala proporcional à raiz quinta das dimensões das partículas (abertura da malha dos peneiros). O eixo das ordenadas refere-se à percentagem de material dos agregados naturais que passa pelos peneiros. Aos dois extremos da reta, para abcissa igual a 0,0065 mm e 4 mm, vão corresponder 0 e 100% de percentagem de material acumulado passado, respetivamente. O terceiro ponto, intermédio, corresponde à abcissa correspondente a metade do $D_{\max}$, sendo que a respetiva ordenada é calculada através da equação (7).

$$Y_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D_{\max}} + \frac{B}{\frac{R}{D_{\max}} - 0,75} \quad (7)$$

onde, A e B são parâmetros sugeridos por Faury (dependentes da natureza dos agregados e da trabalhabilidade da argamassa), $D_{\max}$ é a máxima dimensão do agregado em mm e R é o raio médio do molde em mm (Neves, 2022).

Obtidos os valores A e B, o ponto intermédio é definido por:

$$x = \frac{D_{m\acute{a}x}}{2} = \frac{4}{2} = 2 \text{ mm}$$

$$Y_{D/2} = 30 + 17\sqrt[5]{4} + \frac{2}{1 - 0,75} = 60,43\%$$

A curva de referência de Faury com precursor considera, para além dos agregados, o volume do precursor (cimento ou cinzas volantes). Neste caso, é necessário reformular a curva de modo a que represente apenas o conjunto granular de referência, composto exclusivamente pelos agregados (areias). Para tal, é necessário corrigir a curva de referência com precursor através das equações apresentadas na tabela 11 (Silva, 2007). Assim, definido o traçado da curva de referência de Faury, também foi determinada a curva de Faury sem precursor, sem as partículas dos ligantes, que é obtida sabendo-se a percentagem de precursor que existe (variável c na equação), relativamente ao volume sólido total. Como exemplo, na figura 26 são apresentadas ambas as curvas, com e sem precursor, para o caso da argamassa de cimento.

Tabela 11 - Coordenadas das curvas de referência de Faury, adaptado de Silva (2007).

Diâmetros (mm)	% de material passado (em volume absoluto)	
X	Y (curva com precursor)	Y (curva sem precursor)
$D_{m\acute{a}x}$	100	100
$D_{m\acute{a}x}/2$	$y(D_{max}/2) = A + 17 \times \sqrt[5]{D_{max}} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$	$y = \frac{(y(D_{max}/2) - c) \times 100}{100 - c}$
0,0065	0	$y = \frac{(0 - c) \times 100}{100 - c}$

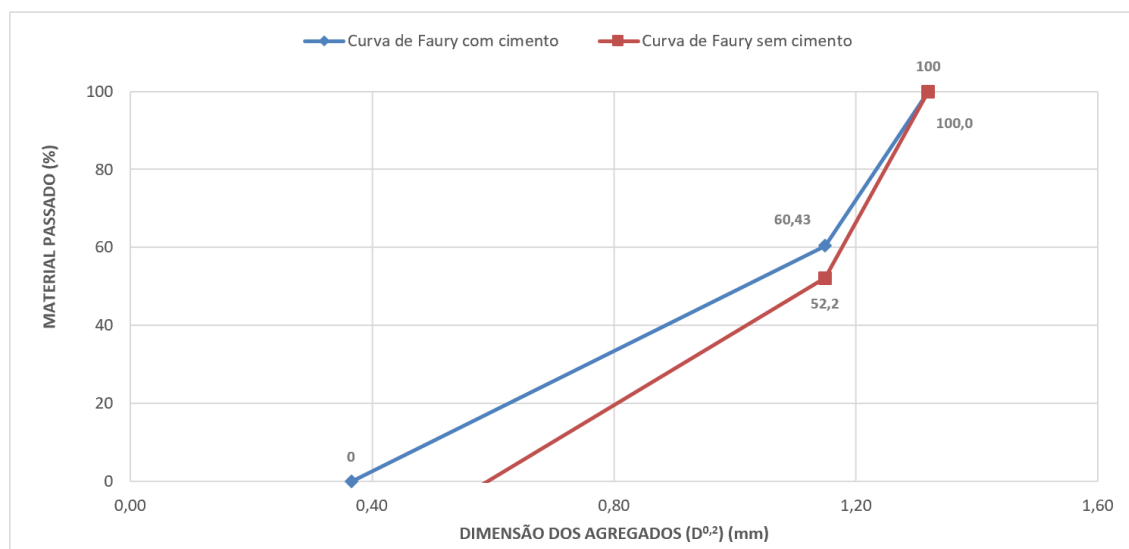


Figura 26 - Curvas de referência de Faury para as argamassas de cimento.

A aproximação da curva real à curva de referência sem precursor pode ser feita analítica ou graficamente. Nesta dissertação foi utilizada a metodologia analítica utilizada na determinação das quantidades dos diversos componentes necessários para a formulação das argamassas, baseada numa folha de cálculo em Excel que efetua os gráficos e cálculos apresentados de seguida.

Para se fazer a comparação entre a curva de referência sem precursor e a curva real desenha-se no mesmo gráfico ambas as curvas granulométricas. O gráfico da curva de referência sem precursor já foi determinado e o traçado da curva real obteve-se variando as percentagens de cada agregado que entra na mistura, e dessa forma a percentagem de cada areia passante em cada peneiro será proporcional a essas quantidades (Nepomuceno, 1999). Assim, a principal vantagem deste método é que, para se calcular as quantidades necessárias de agregados (areia fina e grossa), basta aproximar de forma otimizada a curva granulométrica real com a curva de referência de Faury, conforme apresentado na figura 27, tendo resultado na ponderação de 30% de areia fina e 70% de areia grossa para os dois tipos de argamassas em estudo.

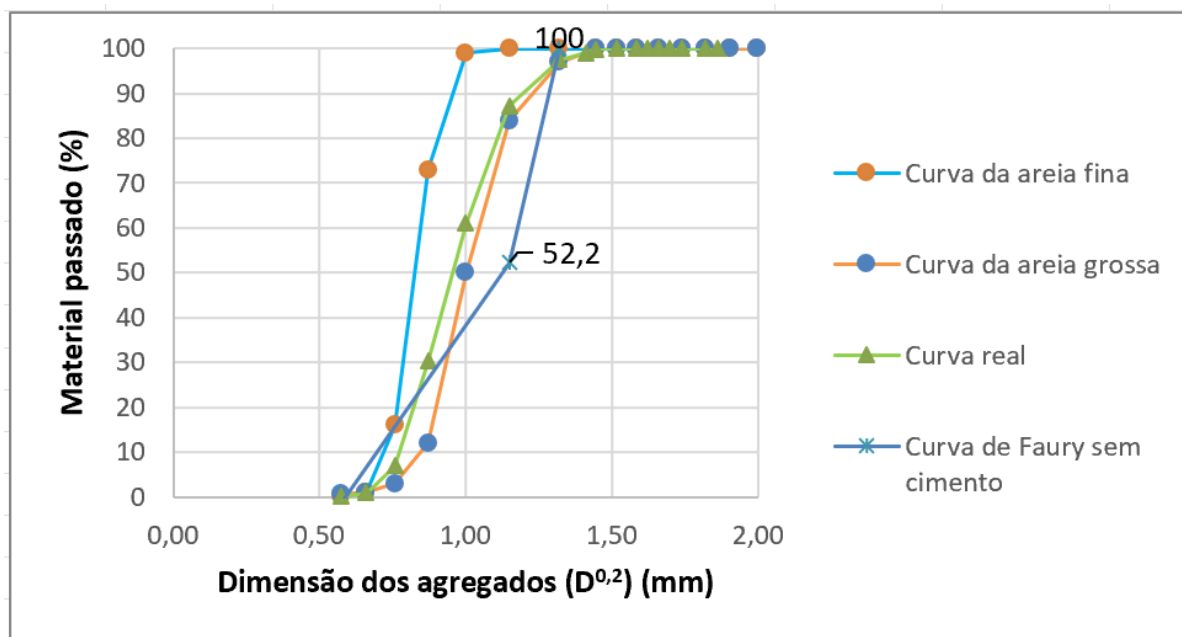


Figura 27 - Comparação da Curva de Faury sem cimento e as curvas da distribuição dos agregados em ARC.

3.4.1 ARGAMASSAS DE CIMENTO

A composição da argamassa de referência de cimento (ARC) foi estabelecida experimentalmente através tentativas sucessivas, variando a relação água/precursor, até se

conseguir o espalhamento 150 ± 10 mm, verificando-se que isso foi alcançado com a relação água/cimento de 0,53 e um espalhamento de 146 mm.

Para determinar a composição das argamassas de cimento teve-se em consideração os valores apresentados nas tabelas 12 e 13 referentes à massa volúmica dos componentes e à razão/proporção definidos entre os componentes.

Tabela 12 - Valores das massas volúmicas necessárias ao cálculo da composição da argamassa.

Componentes da argamassa	Variável	Massa Volúmica (kg/m ³)
Cimento	D_C	3100
Cinza Volante	D_{CV}	2431
Areia Fina	D_{AF}	2630
Areia Grossa	D_{AG}	2630
Superplastificante	D_{SP}	1210
Água	D_{H_2O}	1000
Na_2SiO_3 (SSS)	D_{SSS}	1370
NaOH	D_{NaOH}	2130
SiO_2 na solução Na_2SiO_3	D_{SiO_2}	2196
Na_2O na solução Na_2SiO_3	D_{Na_2O}	2270
H_2O na solução Na_2SiO_3	D_{H_2O}	1000

Tabela 13 - Valores da razão entre vários componentes da argamassa.

Razão	Valor
Na_2O/SSS (massa/massa)	0,08
SiO_2/SSS (massa/massa)	0,28
H_2O/SSS (massa/massa)	0,64
$H_2O/Precursor$ (massa/massa)	0,53 ou 0,38
Superplastificante/Precursor (massa/massa)	0,002
Na_2O/SiO_2	1
Areia Fina (V_{AF})/Total Areia (V_A) (volume/volume)	0,3
Areia Grossa (V_{AG})/Total Areia (V_A) (volume/volume)	0,7

Assim, são indicadas as equações utilizadas para cálculo do volume e massa de cada componente da argamassa com 1 litro, definindo à partida que utilizamos 430 gramas de precursor (M_P).

- Volume de precursor (V_P) :

$$V_P = M_P \div D_C \quad [l/dm^3] \quad (8)$$

- Volume de superplastificante (V_{SP}):

$$V_{SP} = M_P \times 0,002 \div D_{SP} \quad [l/dm^3] \quad (9)$$

- Massa de superplastificante (M_{SP}):

$$M_{SP} = D_{SP} \times V_{SP} \quad [g] \quad (10)$$

- Volume de vazios (V_V): $V_V = 0,035 \text{ l/dm}^3$ - Para a dimensão máxima do agregado de 4 mm.

- Volume total de areia (V_A):

$$V_A = 1 - V_P - V_{SP} - V_{H_2O} - V_V \quad [l/dm^3] \quad (11)$$

- Massa de areia fina (M_{AF}):

$$M_{AF} = V_A \times 0,3 \times D_{AF} \quad [g] \quad (12)$$

- Massa de areia grossa (M_{AG}):

$$M_{AG} = V_A \times 0,7 \times D_{AG} \quad [g] \quad (13)$$

- Volume de água (V_{H_2O}) :

$$V_{H_2O} = 0,53 \times M_P \div 1000 \quad [dm^3] \quad (14)$$

- Massa de água (M_{H_2O}):

$$M_{H_2O} = D_{H_2O} \times V_{H_2O} + 0,002 \times M_{AF} + 0,003 \times M_{AG} \quad [g] \quad (15)$$

Com base nas expressões apresentadas anteriormente, a argamassa de cimento de referência com relação A/P igual a 0,53 é produzida com a distribuição de componentes que consta na tabela 14.

Tabela 14 - Composição da argamassa de cimento de referência (ARC).

Componente	Volume [l/dm^3]	Componente	Massa (1 Litro) [g]
Cimento	0,1387	Cimento	430,0
Água	0,2279	Água	232,1
Superplastificante	0,0007	Superplastificante	0,9
Vazios	0,0350	Areia fina	471,6
Areia	0,5977	Areia grossa	1100,3

Seguidamente, foi determinada a composição das argamassas de cimento com borracha através dos seguintes cálculos:

- Estudo da curva granulométrica da areia fina e da areia grossa e quantificação da massa total de areia com granulometria de 0-1 mm, 1-2 mm e 2-4 mm que compõe a ARC, conforme apresentado nas tabelas 15 e 16;
- Com base no cálculo das massas de areia das três granulometrias presentes na ARC de 2 Litros, passamos ao cálculo das massas de borracha com granulometrias de 0-1 mm, 1-2 mm e 2-4 mm necessárias para cada argamassa com borracha (tabela 17), considerando a percentagem de substituição da areia por borracha em causa e as massas volúmicas de 2630 kg/m³ (areias) e 1100 kg/m³ (borracha), utilizando a equação (16):

$$B_i = \frac{A_i}{2630} \times 1100 \times P_u \quad [g] \quad (16)$$

onde, B_i é a massa de borracha com granulometria i ($i= 0-1$ mm, $1-2$ mm ou $2-4$ mm), A_i é a massa da areia com granulometria i ($i= 0-1$ mm, $1-2$ mm ou $2-4$ mm) na argamassa ARC e P_u é a percentagem de substituição de areia por borracha na argamassa ($P_u= 0,05, 0,1$ ou $0,2$).

Tabela 15 - Curva granulométrica média ponderada da percentagem de acumulado passado de areias.

Acumulado Passado Areias [%]			Curva média ponderada [%]
Peneiro [mm]	Areia 0-2	Areia 0-4	
6,3	100	100	100
4	100	97	97,9
2	100	84	88,8
1	99	50	64,7
0,5	73	12	30,3
0,25	16	3	6,9
0,125	1	1	1
0,063	0,1	0,7	0,52
Ponderação	0,3	0,7	

Tabela 16 - Cálculo da massa de areia com granulometrias 0-1 mm, 1-2 mm e 2-4 mm na ARC (2 Litros).

Granulometria Areia [mm]	Percentagem de areia retida [%]		Quantidade de Areia em ARC		
	Por peneiro	Por peneiro norm.	Granulometria [mm]	Massa [%]	Massa [g]
2 a 4	9,1	9,3	2 a 4	9,3	292,4
1 a 2	24,1	24,6	1 a 2	24,6	773,4
0.5 a 1	34,4	35,1	0 a 1	66,1	2078,1
0.25 a 0.5	23,4	23,9			
0.125 a 0.25	5,9	6,0			
0.063 a 0.125	0,48	0,5			
0 a 0.063	0,52	0,5			
Totais	97,9	100,0			

Tabela 17 - Composição das argamassas de cimento.

Composição das Argamassas de Cimento				
ID da Argamassa	ARC	A5C	A10C	A20C
Volume (L)	2	2	2	2
Relação A/P	0,53	0,53	0,53	0,53
Massa Cimento (g)	860	860	860	860
Massa Areia Fina (g)	943,14	896	848,826	754,512
Massa Areia Grossa (g)	2200,66	2091	1980,594	1760,528
Massa Água (g)	464,3	464,3	464,3	464,3
Massa Superplastificante (g)	1,72	1,72	1,72	1,72
Massa Borracha 0/1 (g)	0	43,5	86,9	173,8
Massa Borracha 1/2 (g)	0	16,2	32,3	64,7
Massa Borracha 2/4 (g)	0	6,1	12,2	24,5

A composição das argamassas de cimento com borracha tratada em hidróxido de sódio é idêntica às argamassas com borracha não tratada.

3.4.2 ARGAMASSAS ATIVADAS ALCALINAMENTE

A composição da argamassa de referência ativada alcalinamente (ARAA) foi estabelecida experimentalmente através de tentativas sucessivas, variando a relação água/precursor, até se conseguir o espalhamento 150 ± 10 mm, verificando-se que isso foi alcançado com uma relação água/precursor de 0,38 e um espalhamento de 155 mm.

Para determinação da composição das argamassas ativadas alcalinamente temos em consideração os valores indicados nas tabelas 12 e 13. Assim, são indicadas as equações utilizadas para cálculo do volume e massa de cada componente da argamassa com 1 litro, definindo à partida que utilizamos 430 gramas de precursor (M_P).

- Volume de precursor (V_P) :

$$V_P = M_P \div D_{CV} \quad [l/dm^3] \quad (17)$$

- Volume de superplastificante (V_{SP}):

$$V_{SP} = M_P \times 0,002 \div D_{SP} \quad [l/dm^3] \quad (18)$$

- Massa de superplastificante (M_{SP}):

$$M_{SP} = D_{SP} \times V_{SP} \quad [g] \quad (19)$$

- Volume de vazios (V_V): $V_V = 0,035 l/dm^3$ - Para a dimensão máxima do agregado de 4 mm.

- Volume de NaOH (V_{NaOH}):

$$V_{NaOH} = \left((0,13 \times M_P) - (0,08 \times 0,13 \times 100 \times M_P \div 28) \right) \div (0,775 \times D_{NaOH}) \quad [l/dm^3] \quad (20)$$

- Massa de NaOH (M_{NaOH}):

$$M_{NaOH} = V_{NaOH} \times D_{NaOH} \quad [g] \quad (21)$$

- Volume de Na_2SiO_3 (V_{SSS}):

$$V_{SSS} = 0,13 \times 100 \times M_P \div (28 \times D_{SSS}) \quad [l/dm^3] \quad (22)$$

- Massa de Na_2SiO_3 (M_{SSS}):

$$M_{SSS} = V_{SSS} \times D_{SSS} \quad [g] \quad (23)$$

- Volume total de areia (V_A):

$$V_A = 1 - V_P - V_{SP} - V_{H_2O} - V_V - V_{NaOH} - V_{SSS} \quad [l/dm^3] \quad (24)$$

- Massa de areia fina (M_{AF}):

$$M_{AF} = V_A \times 0,3 \times D_{AF} \quad [g] \quad (25)$$

- Massa de areia grossa (M_{AG}):

$$M_{AG} = V_A \times 0,7 \times D_{AG} \quad [g] \quad (26)$$

- Volume de água (V_{H_2O}) :

$$V_{H_2O} = (0,38 \times M_P - M_{SSS} \times 0,64) \div 1000 \quad [l/dm^3] \quad (27)$$

- Massa de água (M_{H_2O}):

$$M_{H_2O} = D_{H_2O} \times V_{H_2O} + 0,002 \times M_{AF} + 0,003 \times M_{AG} \quad [g] \quad (28)$$

Com base nas expressões apresentadas anteriormente, a argamassa ativada alcalinamente de referência com relação A/P igual a 0,38 foi produzida com a distribuição de componentes que consta na tabela 18.

Tabela 18 - Composição da argamassa ativada alcalinamente de referência (ARAA).

Componente	Volume [l/dm^3]	Componente	Massa (1 Litro) [g]
Cinzas volantes	0,1769	Cinzas volantes	430,0
Água	0,0371	Água	41,2
Superplastificante	0,0007	Superplastificante	0,9
Vazios	0,0350	Areia fina	458,7
Areia	0,5814	Areia grossa	1070,4
NaOH	0,0237	NaOH	50,5
Na ₂ SiO ₃	0,1452	Na ₂ SiO ₃	198,9

Seguidamente, a composição das argamassas ativadas alcalinamente com borracha foi determinada através dos mesmos cálculos apresentados no caso das argamassas de cimento, onde primeiro são calculadas as massas de areia com granulometrias de 0-1 mm, 1-2 mm e 2-4 mm presentes na ARAA, para depois calcular as massas de borracha a utilizar nas argamassas de acordo com a percentagem de substituição, conforme apresentado nas tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Cálculo da massa de areia com granulometrias 0-1 mm, 1-2 mm e 2-4 mm na ARAA (2 Litros).

Granulometria Areia [mm]	Percentagem de areia retida [%]		Quantidade de Areia em ARAA		
	Por peneiro	Por peneiro norm.	Granulometria [mm]	Massa [%]	Massa [g]
2 a 4	9,1	9,3	2 a 4	9,3	284,4
1 a 2	24,1	24,6	1 a 2	24,6	752,3
0.5 a 1	34,4	35,1	0 a 1	66,1	2021,5
0.25 a 0.5	23,4	23,9			
0.125 a 0.25	5,9	6,0			
0.063 a 0.125	0,48	0,5			
0 a 0.063	0,52	0,5			
Totais	97,9	100,0			

Tabela 20 - Composição das argamassas ativadas alcalinamente.

Composição das Argamassas Ativadas Alcalinamente				
ID da Argamassa	ARAA	A5AA	A10AA	A20AA
Volume (L)	2	2	2	2
Relação A/P	0,38	0,38	0,38	0,38
Massa Cinza Volante (g)	860	860	860	860
Massa Areia Fina (g)	917,5	872	825,75	734
Massa Areia Grossa (g)	2140,8	2034	1926,72	1712,64
Massa Água (g)	82,41	82,41	82,41	82,41
Massa Superplastificante (g)	1,72	1,72	1,72	1,72
Massa NaOH (g)	101	101	101	101
Massa Silicato de Sódio (g)	398	398	398	398
Massa Borracha 0/1 (g)	0	42,3	84,6	169,1
Massa Borracha 1/2 (g)	0	15,7	31,5	62,9
Massa Borracha 2/4 (g)	0	5,9	11,9	23,8

A composição das argamassas ativadas alcalinamente com borracha tratada em hidróxido de sódio é idêntica às argamassas com borracha não tratada.

3.5 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

3.5.1 ARGAMASSAS DE REFERÊNCIA

A produção das argamassas de referência de cimento e de cinzas volantes ativadas alcalinamente foi efetuada de acordo com a norma europeia EN 1015-2 (1998), do seguinte modo:

- 1º O processo de produção das argamassas teve início com a pesagem de todos os materiais necessários à amassadura (cimento, cinza volante, areia fina e grossa, borracha, hidróxido de sódio, silicato de sódio, superplastificante e água) numa balança digital com precisão de 0,1 g (figura 28 a)). A capacidade do balde da misturadora é de 2 Litros por argamassa, pelo que foram utilizadas as quantidades dos componentes das argamassas para produzir este volume de cada vez, resultando na produção de 2 moldes, com 6 provetes no total;
- 2º No caso das argamassas ativadas alcalinamente foi necessário preparar o ativador alcalino juntando previamente a água ao silicato de sódio e posteriormente adicionando o hidróxido de sódio à solução. Mexe-se com vareta de vidro durante 5 minutos até dissolver e, por último, adiciona-se o superplastificante (figura 28 b)). No caso da argamassa de cimento, é necessário juntar apenas a água com o superplastificante e agitar com vareta;
- 3º O precursor (cimento ou cinzas volantes) foi colocado no interior do recipiente da misturadora, previamente humedecida;

- 4º Introdução da água ou da solução do ativador alcalino no recipiente da misturadora rotativa;
- 5º O recipiente foi encaixado na misturadora, selecionou-se o programa automático e ligou-se (figura 28 c));
- 6º Passados 30 s em movimento lento, foram adicionados os agregados finos e misturou-se durante 30 em movimento lento;
- 7º Quando foram completados 60 segundos de amassadura, alterou-se para movimento rápido;
- 8º Após 30 segundos, parou-se a misturadora para se retirar o material colado às paredes e ao fundo do recipiente;
- 9º Finalmente, 60 segundos após a paragem da misturadora, colocou-se a misturadora em movimento rápido por mais 60 segundos.



a) Componentes da argamassa.



b) Ativador alcalino.



c) Misturadora.

Figura 28 - Equipamento e materiais utilizados na produção de argamassas.

3.5.2 ARGAMASSAS COM BORRACHA DE PNEUS USADOS

A produção das argamassas com agregados de borracha seguiu os procedimentos referidos no ponto anterior relativamente às argamassas de referência, acrescentando apenas que os agregados de borracha foram adicionados juntamente com os agregados naturais.

3.6 PREPARAÇÃO DOS PROVETES

A realização dos ensaios consistiu em testar provetes prismáticos preparados em moldes após a produção da argamassa (figura 29 a)), sendo que as dimensões de cada provete prismático foram 40 mm x 40 mm x 160 mm e um molde preparou 3 provetes. O procedimento utilizado para preparar os provetes foi o seguinte:

- 1º Limpeza do molde metálico, montagem e aplicação do óleo descofrante (Petromol - F), sendo que no caso dos moldes para argamassas ativadas alcalinamente ainda é

colocada uma película aderente por cima do óleo descofrante a envolver os moldes, para impedir que a argamassa se prenda ao molde, facilitando a desmoldagem e limpeza final;

2º A argamassa foi introduzida dentro do molde até, aproximadamente, metade da altura dos provetes e compactada mecanicamente com 60 pancadas no compactador, permitindo reduzir os vazios (figura 29 b));

3º O molde foi completo com mais uma camada de argamassa até ao topo e compactado mecanicamente com mais 60 pancadas;

4º Por último, o molde foi retirado do equipamento de compactação e a superfície dos provetes foi regularizada com uma colher de pedreiro para retirar o excesso de argamassa, e, no caso das argamassas ativadas alcalinamente, cobriu-se a face do provete exposta ao ambiente com a película de plástico.



a) Molde de 3 provetes.



b) Molde no compactador.

Figura 29 - Equipamento utilizado na preparação de provetes.

3.7 CONDIÇÕES DE CURA

Após produção, os moldes de argamassas de cimento foram deixados sob ambiente laboratorial (20 ± 5 °C e 60 ± 10 %HR) durante 28 e 56 dias, desmoldando-se os provetes após 24 horas de cura. Posteriormente à desmoldagem, os provetes foram devidamente identificados com o tipo de argamassa e data de produção (figura 30 a)).

No caso dos moldes com argamassas ativadas alcalinamente, passados quinze minutos da compactação, estes foram colocados em estufa a 70° C durante 24 horas (Neves, 2022; Panizza *et al.*, 2018), a fim de acelerar o seu processo de endurecimento em laboratório (figura 30 b)), sendo depois desmoldados e identificados com a designação da argamassa e a data da amassadura (figura 30 c)), permanecendo em cura sob ambiente laboratorial até completar 28 e 56 dias de idade.



a) Cura ao ar ambiente. b) Cura em estufa a 70° C. c) Proveteos identificados.

Figura 30 - Condições de cura dos provetes e identificação.

3.8 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Na primeira fase da campanha experimental, foram realizados ensaios com o intuito de caracterizar os materiais constituintes das argamassas, através das suas propriedades físicas (análise granulométrica, baridade, absorção de água e massa volúmica). Os ensaios respeitam as normas referidas na tabela 21.

Tabela 21 - Ensaios a efetuar na primeira fase e normas aplicáveis.

Fase	Ensaios	Materiais	Norma base
1. ^a	Distribuição Granulométrica	Areias e agregados de borracha	NP EN 933-1 (2012)
	Baridade	Cimento, cinzas volantes, areias e agregados de borracha	NP EN 1097-3 (2002)
	Massa Volúmica	Areias e agregados de borracha	EN 1097-6 (2013)
	Absorção de Água	Areias e agregados de borracha	EN 1097-6 (2013)

3.8.1 BARIDADE

A baridade de um material é a sua massa por unidade de volume aparente, ou seja, tem em conta os vazios existentes entre as partículas. As formas das partículas e como estas se posicionam num dado volume, simultaneamente com o grau de compactação a que estão sujeitas, influenciam o valor da massa volúmica aparente. A norma NP EN 1097-3 (2002) foi utilizada para determinar a baridade do cimento, cinzas volantes, agregados naturais e borracha.

Equipamento:

O equipamento necessário para a realização do ensaio foi:

- Estufa ventilada com a temperatura de 110 ± 5 °C;

- Balança com precisão de $\pm 0,1$ g;
- Colher de pedreiro;
- Tabuleiro e recipiente metálico de 1 litro (figura 31 a)).

Procedimento:

O procedimento do ensaio foi o seguinte:

- Depois de se secar a amostra na estufa durante 48 horas à temperatura de 100°C até atingir massa constante, arrefeceu-se no exsiccador com sílica gel durante uma hora;
- O recipiente metálico de volume 1 litro foi pesado e registou-se a sua massa como M_A ;
- A amostra foi colocada dentro do recipiente até transbordar, sem compactação (figura 31 b));
- Rasou-se a superfície do topo do recipiente, removendo-se o excesso de material;
- O conjunto foi pesado e a massa registada como M_B (figura 31 c));
- Para cada material foram consideradas três amostras, sendo que a média dos resultados é o valor da baridade.

Resultados:

A baridade dos materiais é determinada através da equação (29):

$$\rho_b = \frac{M_B - M_A}{V} \quad (29)$$

onde, ρ_b é a baridade do material, M_A é a massa do recipiente metálico vazio, M_B é a massa do recipiente metálico cheio com a amostra e V é o volume do recipiente metálico (1 dm^3).



a) Recipiente de 1 Litro.



b) Enchimento do recipiente.



c) Pesagem da amostra.

Figura 31 - Equipamento utilizado no ensaio da baridade.

3.8.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Este ensaio possibilita a construção de uma curva granulométrica para cada tipo de agregado, permitindo avaliar a sua granulometria. Na sua execução, o material da amostra foi separado por um conjunto de peneiros de abertura variável, com a dimensão das partículas a enquadrar-se entre o tamanho das aberturas dos peneiros inferior, que as reteve, e superior, por onde passaram. A norma seguida para a realização da análise granulométrica dos agregados naturais e borracha é a NP EN 933-1 (2012).

Equipamento:

O equipamento utilizado neste ensaio foi:

- Estufa ventilada com a temperatura de 110 ± 5 °C;
- Balança com precisão de $\pm 0,1$ g;
- Peneiros de malha quadrada em mm: 0,0625, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16 e 31,5;
- Tabuleiro, recipiente de fundo e tampa para os peneiros;
- Agitador de peneiros.

Procedimento:

O procedimento do ensaio foi o seguinte:

- A amostra foi seca em estufa durante 48 horas à temperatura de 100° C até atingir a massa constante, e depois arrefeceu-se no exsiccador com sílica gel durante uma hora, e pesou-se registando o valor como m_{total} ;
- O recipiente de fundo e cada peneiro utilizado foram pesados e registou-se esses valores (figura 32 a));
- Por ordem crescente da dimensão de abertura dos peneiros, estes foram encaixados uns nos outros, com o recipiente no fundo, formando uma coluna;
- A amostra foi introduzida no peneiro superior, tapou-se com a tampa e colocou-se a coluna de peneiros no agitador, o qual efetua movimentos de translação e rotação. A vibração durou cinco minutos (figura 32 b));
- A massa de partículas retidas em cada peneiro foi pesada em conjunto com o peneiro e registou-se como $m_{peneiro}$, após descontar o peso do respetivo peneiro (figura 32 c)). O material retido no recipiente de fundo também foi pesado e a sua massa designada como m_{refugo} .

Resultados:

A percentagem retida em cada peneiro resulta da equação (30):

$$\% \text{ retido} = \frac{m_{\text{peneiro}}}{m_{\text{total}}} \times 100 \quad (30)$$

onde, % retido é a percentagem de material retido num dado peneiro (%), m_{peneiro} é a massa retida em cada peneiro e m_{total} é a massa total da amostra.

Por fim, calculou-se a percentagem de material acumulado passado em cada um dos peneiros, de modo a obter-se a curva granulométrica. A percentagem de material acumulado passado num dado peneiro obteve-se através da diferença entre 100 e o somatório da percentagem do material retido no peneiro em causa e das percentagens do material retido em todos os peneiros de abertura maior. A curva granulométrica de cada agregado foi definida através destas percentagens, colocando no eixo das ordenadas a percentagem de material acumulado passado nos peneiros e as respetivas aberturas no eixo das abcissas.



a) Peneiro de malha quadrada.



b) Agitador de peneiros.



c) Pesagem do material retido.

Figura 32 - Equipamento do ensaio de distribuição granulométrica.

3.8.3 MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

A determinação da massa volúmica e da absorção de água dos agregados (areias e borracha) seguiu a norma EN 1097-6 (2013). O ensaio de absorção de água determina a quantidade de água que é absorvida pelos agregados e que é necessário compensar na amassadura para não diminuir a relação água/precursor efetiva. Por outro lado, a massa volúmica da argamassa é determinada pela massa volúmica dos seus constituintes, pelo que interessa conhecer a massa volúmica dos agregados.

Equipamento:

O equipamento utilizado neste ensaio foi:

- Tabuleiro;
- Balança com precisão de $\pm 0,01$ g;
- Estufa ventilada com a temperatura de 110 ± 5 °C;

- Peneiros de malha quadrada com aberturas de 0,063 e 4 mm e recipiente de fundo;
- Picnómetro de 100 ml (figura 33 a));
- Cone troncocónico e pilão.

Procedimento:

O procedimento do ensaio foi o seguinte:

- O ensaio iniciou-se com a preparação da amostra com massa superior a 100 g, com partículas de granulometria entre 0,063 e 4 mm. Seguiu-se a lavagem da amostra, com um peneiro de 0,063 mm, de modo a eliminar as partículas mais finas (figura 33 b));
- Após a lavagem, a amostra foi seca numa estufa ventilada à temperatura de 100 °C durante 48 horas até atingir a massa constante;
- De seguida, a amostra de agregado seco arrefeceu no exsiccador com sílica gel durante uma hora, e foi pesada sendo registada a massa M_4 .
- Encheu-se o picnómetro de água até à marca sem deixar ar no interior e secou-se o exterior, seguidamente o picnómetro com água foi pesado e a sua massa foi registada como M_3 , despejando-se de seguida o picnómetro (figura 33 c));
- Depois, colocou-se a amostra dentro do picnómetro de 100 ml e juntou-se água no restante volume, agitou-se o picnómetro numa posição inclinada para eliminar o ar ocluído;
- A amostra foi mantida imersa durante $24 \pm 2,5$ horas;
- O picnómetro foi novamente agitado e adicionou-se água ao picnómetro até à marca de nível sem deixar ar no interior e secou-se o exterior;
- Pesou-se o picnómetro com a água e amostra no interior e registou-se a massa M_2 ;
- Retirou-se a maior parte da água e verteu-se o restante conteúdo num tabuleiro;
- A amostra foi espalhada no tabuleiro e secou-se a humidade superficial das partículas com uma fonte de ar quente (figura 33 e));
- Para garantir uma secagem uniforme e a evaporação de toda a humidade superficial, a amostra foi remexida em intervalos frequentes;
- Para validar o estado saturado com superfície seca, colocou-se a amostra num molde troncocónico (figura 33 d)), compactando ligeiramente o material com 25 pancadas aplicadas com um pilão metálico. Retirou-se cuidadosamente o molde e verificou-se se a amostra mantinha a forma troncocónica. Se sim, continuava-se com o processo de secagem até apresentar uma deformação após a desmoldagem (figura 33 f));

- O agregado saturado com superfície seca foi pesado e a massa registrada como M_1 .

Resultados:

Massa volúmica do material impermeável das partículas ρ_a [kg/m³]:

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (31)$$

Massa volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd} [kg/m³]:

$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (32)$$

Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, ρ_{ssd} [kg/m³]:

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (33)$$

Absorção de água ao fim de 24 h de imersão, WA_{24} [%]:

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (34)$$

onde, M_1 é a massa saturada com superfície seca do agregado, M_2 é a massa do picnómetro com amostra de agregado e água, M_3 é a massa do picnómetro apenas com água, M_4 é a massa da amostra seca em estufa e ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio para 20 °C [998 kg/m³].

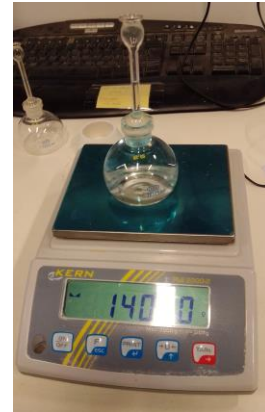
,



a) Picnómetro de 100 ml.



b) Lavagem da amostra.



c) Pesagem do picnómetro.



d) Molde troncocônico.



e) Fonte de ar quente.



f) Validação da saturação.

Figura 33 - Equipamento do ensaio de absorção de água e massa volúmica.

3.9 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

A caracterização das argamassas no estado fresco na 2.^a fase da campanha foi efetuada pelos ensaios e segundo as normas referidos na tabela 22.

Tabela 22 - Ensaaios a efetuar na segunda fase nas argamassas no estado fresco.

Fase	Ensaios	Tipo	Norma base
2. ^a	Consistência por espalhamento	Argamassa em pasta	EN 1015-3 (1999)
	Massa volúmica	Argamassa em pasta	EN 1015-6 (1999)

3.9.1 CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

Para cada argamassa de referência foram efetuadas amassaduras experimentais, onde foram utilizadas diferentes relações água/precursor até se atingir o espalhamento de 150 ± 10 mm. Posteriormente, o ensaio também foi efetuado em todas as argamassas com borracha. Para realizar o ensaio da mesa de espalhamento, seguiu-se a norma EN 1015-3 (1999). A execução do ensaio permite perceber a consistência e a trabalhabilidade de uma argamassa e a quantidade de líquido que é necessária adicionar para obter o espalhamento pretendido. A trabalhabilidade consiste na maior ou menor facilidade com que uma argamassa é fabricada, transportada e aplicada em obra.

Equipamento:

Para a realização do ensaio, o equipamento utilizado foi o seguinte (figura 34):

- Pano húmido;
- Mesa de espalhamento e molde troncocônico;
- Colher de pedreiro e pilão;

- Craveira.

Procedimento:

O procedimento de realização do ensaio foi o seguinte:

- Limpou-se com pano húmido a superfície da mesa de espalhamento, o molde e o pilão;
- O molde troncocónico foi colocado no centro da mesa de espalhamento e a argamassa foi introduzida no seu interior em duas camadas, cada uma compactada com 15 pancadas com o pilão;
- A argamassa em excesso foi retirada com uma colher de pedreiro e limpou-se, com cuidado, toda a área em volta do molde;
- Depois, o molde foi retirado lentamente na vertical e, de seguida, deu-se 15 pancadas com a frequência de uma pancada em cada 1 segundo, através da rotação do manípulo da mesa de espalhamento;
- Utilizando a craveira, mediu-se o diâmetro, em mm, da argamassa espalhada, em duas direções ortogonais e anotam-se os resultados.

Resultados:

O cálculo do valor médio das duas medições corresponde ao resultado do ensaio, e caso esse valor se desvie do valor 150 ± 10 mm para a consistência das argamassas de referência, o ensaio deverá ser repetido com uma nova mistura, adotando outra relação água/precursor até se atingir o valor de espalhamento pretendido. O valor da relação A/P utilizado na argamassa de referência com espalhamento de 150 ± 10 mm também foi utilizado na formulação das argamassas com borracha, independentemente do espalhamento apresentado nessas argamassas, pelo que a realização do ensaio permite saber a influência da borracha na trabalhabilidade.



a) Equipamento do ensaio.



b) Argamassa espalhada.

Figura 34 - Equipamento do ensaio e espalhamento de amostra de argamassa.

3.9.2 MASSA VOLÚMICA

O ensaio de massa volúmica no estado fresco foi realizado seguindo a norma EN 1015-6 (1999). A massa volúmica de uma argamassa no estado fresco depende dos vários constituintes que a integram e é definida pelo quociente entre a massa de argamassa e o volume por esta ocupada.

Equipamento:

O ensaio foi realizado com o seguinte equipamento:

- Balança de precisão;
- Recipiente metálico com capacidade para 1 litro (figura 35 a));
- Pano húmido, espátula e colher de pedreiro.

Procedimento:

A realização do ensaio seguiu o seguinte procedimento:

- O recipiente metálico foi pesado e registou-se a sua massa como M_1 ;
- Preparou-se a argamassa, numa quantidade suficiente para encher um recipiente cilíndrico com capacidade para 1 Litro;
- A argamassa foi colocada com a colher de pedreiro no interior do recipiente até metade da sua capacidade e compactou-se com 10 pancadas, através da oscilação do recipiente em lados alternados sobre uma mesa;
- O recipiente foi completamente cheio e compactou-se de igual modo;
- Rasou-se com uma espátula a superfície do recipiente para retirar o excesso de argamassa e nivelar a superfície;
- Limpou-se o exterior do recipiente com um pano húmido e procedeu-se à pesagem do conjunto (recipiente mais argamassa fresca), registando-se a massa como M_2 (figura 35 b)).

Resultados:

A massa volúmica de uma argamassa no estado fresco é dada pela equação (35):

$$\rho_m = \frac{M_2 - M_1}{V_v} \quad (35)$$

onde, M_1 é a massa do recipiente metálico vazio, M_2 é a massa do recipiente metálico preenchido com argamassa e V_v é o volume do recipiente metálico (1 dm³).



a) Recipiente com 1 Litro de volume.



b) Pesagem na balança.

Figura 35 - Equipamento do ensaio da massa volúmica.

3.10 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A caracterização das argamassas no estado endurecido aos 28 e 56 dias de idade, durante a 2.^a fase da campanha experimental, foi efetuada através dos ensaios e normas referidos na tabela 23.

Tabela 23 - Ensaios a efetuar na segunda fase nas argamassas no estado endurecido.

Fase	Ensaio	Tipo	Idade (dias)	N.º de provetes	Norma base
2. ^a	Resistência à compressão	Argamassa no estado endurecido	28	3	EN 1015-11 (2019)
			56	3	
	Resistência à tração por flexão	Argamassa no estado endurecido	28	3	EN 1015-11 (2019)
			56	3	
	Módulo de Elasticidade Dinâmico	Argamassa no estado endurecido	28	2	ASTM E1876 (2022)
			56	2	
	Porosidade Aberta	Argamassa no estado endurecido	28	3	RILEM I.1.
			56	3	
	Massa Volúmica	Argamassa no estado endurecido	28	3	RILEM I.1.
			56	3	
	Absorção de água por imersão	Argamassa no estado endurecido	28	3	LNEC E-394 (1993)
			56	3	
	Absorção de água por capilaridade	Argamassa no estado endurecido	28	3	EN 1015-18 (2002)
			56	3	
	Velocidade de propagação de ultra-sons	Argamassa no estado endurecido	28	2	EN 12504-4 (2021)
			56	2	

3.10.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (POR FLEXÃO) E À COMPRESSÃO

Para a realização do ensaio da resistência à tração por flexão, teve-se em consideração a norma europeia EN 1015-11 (2019). O ensaio de resistência à flexão consiste em aplicar aos prismas de argamassas, assentes em dois apoios cilíndricos afastados de 100 mm, forças crescentes a meio vão, até à rotura. O ensaio foi realizado aos 28 e aos 56 dias de idade, utilizando-se 3 prismas (provetes) para cada tipo de argamassa.

Equipamento:

O ensaio foi realizado com a máquina de ensaios de marca “Cybertronic”, de onde se retirou o valor da força máxima aplicada sobre o provete.

Procedimento:

O procedimento seguinte foi adotado para a realização do ensaio da resistência à flexão:

- Ao atingir a idade pretendida, cada provete foi ensaiado sendo colocado sobre os cilindros de apoio na máquina de ensaios e com o seu eixo longitudinal perpendicular aos cilindros (figura 36 a));
- Em seguida, aplicou-se a carga concentrada crescente a meio vão, a uma taxa uniforme entre 10 e 50 N/s, para que a rotura acontecesse num período de 30 a 90 segundos (figura 36 b));
- Por fim, registou-se a força da rotura, que é o valor da carga máxima aplicada durante o ensaio.



a) Equipamento do ensaio de tração.



b) Rotura frágil do provete por flexão.

Figura 36 - Equipamento e rotura do provete no ensaio de tração por flexão.

Resultados:

A resistência à flexão foi calculada usando a equação (36):

$$f = 1,5 \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (36)$$

onde, f é a resistência à flexão, F é a carga máxima aplicada, l é a distância entre apoios (100 mm), b é a largura do provete (40 mm) e d é a espessura do provete (40 mm).

A resistência à flexão para um dado tipo de argamassa resulta da média das tensões máximas dos três provetes.

O ensaio da resistência à compressão também foi realizado segundo a norma EN 1015-11 (2019). O ensaio à compressão aplica, às metades dos prismas resultantes do ensaio à tração, forças de compressão crescentes até à rotura. O ensaio foi realizado aos 28 e aos 56 dias de idade, utilizando-se 3 semi-prismas para cada tipo de argamassa.

Equipamento:

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com a máquina de ensaios de marca “Cybertronic”, de onde se retirou o valor da carga máxima aplicada sobre o provete.

Procedimento:

O ensaio da resistência à compressão foi realizado do seguinte modo:

- O ensaio realizou-se imediatamente após o ensaio de flexão sobre os semi-prismas resultantes;
- Cada metade do provete foi colocada na placa de ensaio e aplicou-se uma carga crescente de compressão com a mesma máquina, mas no acessório relativo à compressão. O carregamento foi aplicado a uma taxa uniforme no intervalo entre 50 e 500 N/s, de modo que a rotura ocorresse entre o período de 30 a 90 segundos (figura 37 a));
- Registou-se a força de rotura que corresponde ao valor da carga máxima aplicada.



a) Equipamento do ensaio de compressão.



b) Modo de rotura à compressão.

Figura 37 - Equipamento do ensaio e forma de rotura à compressão do provete.

Resultados:

A resistência à compressão foi determinada através da equação (37):

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (37)$$

onde, f_c é a resistência à flexão, F é a carga máxima aplicada, A é a área de aplicação da carga (40 mm x 40 mm).

A resistência à compressão para um dado tipo de argamassa resulta da média das tensões máximas dos três semi-prismas.

3.10.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O módulo de elasticidade é um parâmetro que caracteriza a curva tensão-extensão em regime de deformação elástica, sendo este parâmetro o declive da reta. É um parâmetro que exprime a capacidade de uma argamassa para se deformar e permite estimar a rigidez da

argamassa. Quanto menor for o seu valor, maior é a deformabilidade de uma argamassa. Assim, para se obter um reboco pouco suscetível à fendilhação, convém que este apresente um módulo de elasticidade reduzido.

Este ensaio foi realizado segundo a norma ASTM E1876 (2022), onde o módulo de elasticidade é determinado indiretamente através da frequência de ressonância à flexão e recorrendo a um programa computacional.

Equipamento:

O ensaio foi realizado com o seguinte equipamento:

- Balança com precisão de $\pm 0,1\%$;
- Craveira;
- Sistema de apoios ou ripas;
- Equipamento de ensaios com baqueta impulsora e sensor de impulsos de marca GrindoSonic, modelo MK5 “Industrial”.

Procedimento:

O ensaio realizou-se do seguinte modo:

- As massas e as dimensões dos provetes foram registadas após a cura;
- Apoiou-se os provetes em cima de ripas dispostas transversalmente ao comprimento do provete nos pontos nodais fundamentais, marcados a uma distância de $0,224 \times L$ (3,6 cm) de cada extremo do provete, sendo L o comprimento do provete de 160 mm;
- Encostou-se o microfone do sensor de impulsos na face longitudinal do provete a uma distância de 3,6 cm da extremidade esquerda e deu-se um impulso com a baqueta de peso normalizado no centro da face superior do provete (figura 38 a));
- O equipamento determinou as frequências de ressonância do modo de vibração à flexão até obter-se três leituras consecutivas com uma variação inferior a 1%, registando-se os valores (figura 38 b)).



a) Posição do martelo e microfone.



b) Equipamento de leitura de frequências.

Figura 38 - Equipamento do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.

Resultados:

Os dados obtidos durante a realização do ensaio foram introduzidos num programa computacional designado “WINEMOD” (Versão 2.05) pertencente ao equipamento do ensaio e determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico, considerando o coeficiente de Poisson variável consoante a massa de borracha incorporada na argamassa. A frequência de ressonância inserida no programa é a média das três leituras.

A equação (38) é utilizada pelo programa para a determinação do valor do ensaio, de acordo com a norma ASTM E1876 (2022):

$$E = 0,9465 \left(\frac{mf_f^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad (38)$$

onde, E é o módulo de elasticidade dinâmico, m é a massa do provete, f_f é a frequência de ressonância fundamental de flexão do provete, b é a largura do provete (40 mm), L é o comprimento do provete (160 mm), t é a altura do provete (40 mm) e μ é o coeficiente de Poisson. O Coeficiente de Poisson da argamassa foi estimado através da equação (39) conforme resultados apresentados na tabela 24, onde $\mu_{\text{Arg.ref.}} = 0,20$, $\mu_{\text{borracha}} = 0,50$, $\%vol_{\text{Arg.ref.}}$ e $\%vol_{\text{borracha}}$ são, respetivamente, as percentagens volumétricas de argamassa (todos os componentes que não a borracha) e de borracha, num dado volume de argamassa, de acordo com Duarte *et al.* (2017). Adicionalmente, T_1 (na equação (38)) é um fator de correção para o modo fundamental de flexão tendo em conta a altura finita do provete e o coeficiente de Poisson, que é dado pela equação (40):

$$\mu_{\text{Arg.}} = \frac{\mu_{\text{Arg.ref.}} \times \%vol_{\text{Arg.ref.}} + \mu_{\text{borracha}} \times \%vol_{\text{borracha}}}{100} \quad (39)$$

Tabela 24 - Determinação do valor do coeficiente de Poisson das argamassas.

ID da Argamassa	ARC	A5C/A5C-T	A10C/A10C-T	A20C/A20C-T
Massa total de borracha em 1 L (g)	0	32,85	65,75	131,50
Volume de borracha (%)	0	2,99	5,98	11,95
Volume da argamassa sem borracha (%)	100	97,01	94,02	88,05
Coeficiente de Poisson da Argamassa	0,2	0,21	0,22	0,24
ID da Argamassa	ARAA	A5AA/A5AA-T	A10AA/A10AA-T	A20AA/A20AA-T
Massa total de borracha em 1 L (g)	0	32	63,95	127,9
Volume de borracha (%)	0	2,91	5,81	11,63
Volume da argamassa sem borracha (%)	100	97,09	94,19	88,37
Coeficiente de Poisson da Argamassa	0,2	0,21	0,22	0,23

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L} \right)^4 - \left(\frac{8,340(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^4}{1 + 6,338(1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2} \right) \quad (40)$$

3.10.3

3.10.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

O ensaio da absorção de água por imersão foi realizado de acordo com a norma LNEC E-394 (1993). Pela realização do ensaio de determinação da absorção de água por imersão pretende-se caracterizar a capacidade de absorção de água da argamassa quando submetida a um período de imersão de 48 horas à pressão atmosférica. Como provetes das várias argamassas, utilizaram-se 3 topos íntegros resultantes do ensaio de tração.

Equipamento:

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado com o seguinte equipamento:

- Recipiente com capacidade suficiente para provetes e água para cobri-los;
- Balança de precisão;
- Exsicador de sílica com gel;
- Pano absorvente;
- Estufa ventilada.

Procedimento:

Os procedimentos para execução do ensaio são os seguintes:

- Secou-se previamente os provetes em estufa ventilada durante 48 horas à temperatura de 100°C, até ser atingida massa constante, e posteriormente arrefeceram-se os provetes no exsicador com sílica em gel durante uma hora (figuras 39 a) e b));
- Pesou-se os provetes e registou-se a massa inicial (massa seca) (figura 39 c));
- Submergiram-se totalmente os provetes por 48 horas num recipiente com água, colocando-se os provetes encostados a uma parede do recipiente e inclinados a ~45° (para permitir alguma saída de ar), para garantir que absorvam a maior quantidade de água possível (figura 39 d));
- Retirou-se cada provete da água, passou-se um pano húmido em cada face (para remover o excesso de água) e mediu-se a massa saturada com superfície seca, registando esses resultados;
- Deixou-se os provetes secar ao ar (umas horas ou de um dia para o outro) antes de os colocar novamente em estufa para ensaio seguinte.

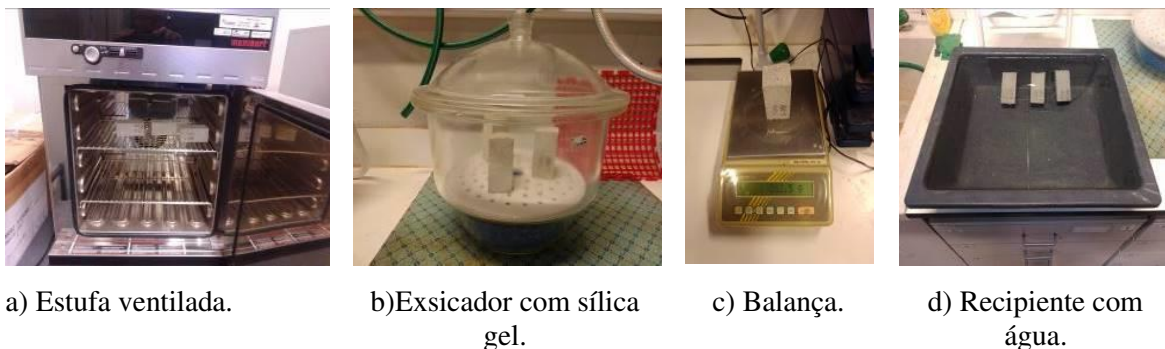


Figura 39 - Equipamento do ensaio de absorção de água por imersão.

Resultados:

A absorção de água por imersão (AAI) é a razão entre o peso de água absorvido pelo provete saturado e o peso do provete seco, em percentagem, determinada pela equação (41):

$$\text{absorção de água [\%]} = \frac{(m_{\text{sat}} - m)}{m} \times 100 \quad (41)$$

onde, m_{sat} é a massa do provete saturado com a superfície seca, m é a massa do provete seco.

3.10.4 POROSIDADE ABERTA E MASSA VOLÚMICA

A porosidade aberta é a relação entre o volume de vazios acessíveis pela água e o volume total, ou seja, é uma medida do grau de saturação dos poros do provete. Verifica-se que quanto maior a porosidade, maior é a sensibilidade à degradação, considerando que o provete absorve mais água contendo substâncias nocivas dissolvidas. Como provetes das várias argamassas, utilizaram-se os mesmos 3 topos íntegros utilizados no ensaio de absorção de água por imersão. O ensaio da porosidade aberta e determinação da massa volúmica aparente são efetuados com base na RILEM I.1. (1980).

Equipamento:

O ensaio foi realizado com o seguinte equipamento:

- Aparelho de ensaio de porosidade aberta e massa volúmica (com bomba de vácuo) para provetes e água para cobri-los;
- Balança de precisão;
- Balança de precisão hidrostática;
- Tanque com água;
- Exsicador de sílica gel;
- Pano absorvente;
- Estufa ventilada.

Procedimento:

Os procedimentos para execução do ensaio de porosidade aberta e massa volúmica são os seguintes:

- Secou-se previamente os provetes em estufa ventilada durante 48 horas à temperatura de 100°C até ser atingida massa constante e, posteriormente, arrefeceram-se os provetes no exsicador com sílica em gel durante uma hora;
- Pesou-se e registou-se a massa inicial (massa seca);
- Colocaram-se os provetes no exsicador (que tem ligações à bomba de vácuo e ao reservatório de água) e ligou-se a bomba de vácuo (figura 40 a));
- Passadas 24 horas, mantendo a bomba de vácuo ligada, submergiu-se os provetes em água. O nível da água teve que estar acima da franja de absorção capilar de cada provete;
- Passadas 24 horas, desligou-se a bomba de vácuo e abriu-se o sistema para libertar o vácuo existente no interior do aparelho de porosidade aberta;
- Passadas 24 horas, abriu-se a tampa do exsicador para pesagem e registo da massa hidrostática dos provetes (usando cesto e gancho na balança) (figura 40 c)) e registou-se a massa dos provetes saturados com a superfície seca, sendo que, previamente, as amostras foram cuidadosamente limpas com um pano húmido para se retirar o excesso de água superficial;
- Deixou-se os provetes secar ao ar (umas horas ou de um dia para o outro) antes de os colocar novamente em estufa para o ensaio seguinte.



a) Aparelho da porosidade aberta.



b) Pressão no exsicador.



c) Balança hidrostática.

Figura 40 - Equipamento do ensaio de porosidade aberta e massa volúmica.

Resultados:

A porosidade aberta (P.A.) de uma argamassa corresponde ao quociente entre o volume dos poros abertos (quantidade de poros acessíveis pela água) e o volume exterior do provete, em percentagem, dada pela equação (42):

$$\text{Porosidade aberta [\%]} = \frac{m_{\text{sat}} - m}{m_{\text{sat}} - m_{\text{imerso}}} \times 100 \quad (42)$$

A massa volúmica (M.V.) aparente por imersão [kg/m^3] é determinada através do ensaio da porosidade aberta e representa o quociente entre a massa do provete seco e o volume aparente e é determinada através da equação (43):

$$\text{Massa volúmica aparente por imersão [kg.m}^{-3}\text{]} = \frac{m}{m_{\text{sat}} - m_{\text{imerso}}} \times \rho_{rh} \quad (43)$$

onde, m_{sat} é a massa do provete saturado com a superfície seca, m é a massa do provete seco, m_{imerso} é a massa hidrostática do provete e ρ_{rh} é a massa volúmica da água a 20 °C [998 kg/m^3].

3.10.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade permite quantificar a absorção de água por ascensão através dos vasos capilares. Este método, tal como a absorção por imersão, é considerado uma forma indireta de analisar a porosidade do provete, obtida através do ensaio da porosidade aberta. A absorção por capilaridade surge pelas diferenças de pressão entre a superfície livre da água e a superfície livre, dessa mesma água, no interior dos vasos capilares. O ensaio realizou-se segundo a norma EN 1015-18 (2002) e utilizando-se os mesmos 3 semi-prismas utilizados no ensaio de absorção de água por imersão.

Equipamento:

O ensaio foi realizado com o seguinte equipamento:

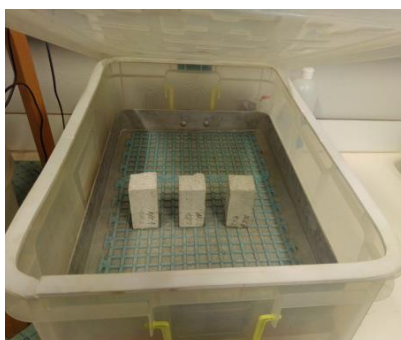
- Estufa ventilada;
- Exsicador com sílica gel;
- Balança de precisão;
- Grelha;
- Pano absorvente;
- Tabuleiro metálico e campânula.

Procedimento:

A execução do ensaio compreende os seguintes procedimentos:

- Secou-se previamente os provetes em estufa ventilada a 100 °C por 48 horas e, posteriormente, arrefeceu-se no exsicador com sílica gel durante uma hora;
- Pesou-se e registou-se a massa seca inicial dos provetes;

- Marcou-se os provetes com uma linha transversal à distância de 5 mm da base íntegra (e regular) do provete;
- Colocou-se os provetes num tabuleiro sobre grelha de plástico com pernos virados para cima, para minimizar a área de contacto entre a base do provete e a grelha (figura 41 a));
- Encheu-se o tabuleiro com água, de tal forma que os provetes ficassem imersos em 5 mm da sua altura;
- Cobriu-se o tabuleiro com uma campânula para evitar evaporação da água e verificou-se o nível de água ao longo do ensaio, corrigindo sempre que necessário;
- Retiraram-se os provetes do tabuleiro, limpando-se a superfície imersa num pano absorvente e registaram-se periodicamente as massas aos 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min, 6 horas e em períodos de 24 horas, após o instante inicial (figura 41 b));
- O ensaio terminou quando a curva de absorção tendeu para uma assíntota;
- Deixou-se os provetes secar ao ar (umas horas ou de um dia para o outro) antes de os colocar novamente em estufa para ensaio seguinte.



a) Tabuleiro com grelha e água.



b) Balança de precisão.

Figura 41 - Equipamento do ensaio de capilaridade.

Resultados:

A absorção de água por capilaridade (kg/m^2) é obtida pela equação (44):

$$AAC = (M_i - M_0) / A_s \quad (44)$$

onde, AAC é a absorção de água por capilaridade, M_i é a massa do provete quando este esteve em contacto com a água durante o tempo t , M_0 é a massa do provete seco em estufa e A_s é a área da face inferior do provete que esteve em contacto com água.

Com estes dados, é possível traçar a curva média de absorção de água por capilaridade de cada argamassa (média de 3 provetes), que relaciona a massa de água absorvida por unidade de área com a raiz quadrada do tempo decorrido ($t^{0.5}$).

Para complementar as curvas de absorção de água por capilaridade, calcularam-se os valores do coeficiente de absorção de água (C.C.), que traduz a velocidade de absorção de água nos momentos iniciais, e o valor assintótico (V.A.), correspondente à quantidade total de água absorvida por unidade de superfície, quando a diferença (ΔM_i) entre dois valores de massa, M_i e M_{i-1} , seja próxima de 1%. O coeficiente de absorção de água foi calculado através da inclinação da curva de absorção no domínio linear, que é igual ao declive da linha de tendência que passa na origem do referencial (exemplo na figura 42).

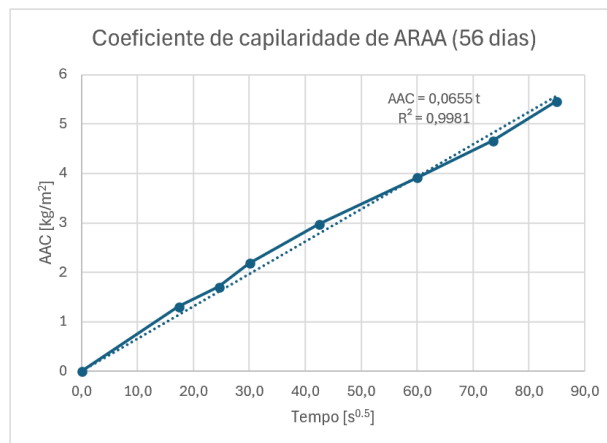


Figura 42 - Declive da linha de tendência no domínio linear da curva de ARAA aos 56 dias.

3.10.6 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

O ensaio dos ultrassons é um método não destrutivo que permite determinar a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas longitudinais no interior da argamassa, permitindo avaliar a homogeneidade e compacidade, pois quanto mais densa, maiores são os valores obtidos. Esta velocidade depende do material e da sua porosidade, pois é maior em meios sólidos contínuos do que em meios gasosos. A norma utilizada para este ensaio é a EN 12504-4 (2021) e a medição foi feita posicionando os transdutores nas faces opostas mais afastadas do provete. Este ensaio foi realizado em dois provetes prismáticos nas idades de 28 e 56 dias para cada argamassa.

Equipamento:

O equipamento para a realização do ensaio foi o seguinte:

- Aparelho de ultrassons de marca PROSEQ, modelo PUNDITLAB (figura 43 a));
- Transdutores;
- Vaselina ou pasta dentífrica.

Procedimento:

O seguinte procedimento foi adotado para realizar o ensaio:

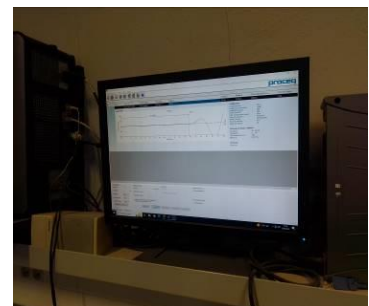
- Em primeiro lugar, foi necessário realizar a calibração prévia do aparelho de ultrassons com uma barra de acrílico própria para este efeito, com um tempo de propagação conhecido (25,4 μ s), fazendo-se coincidir este valor com aquele que é mostrado pelo aparelho;
- De seguida, aplicou-se pasta dentífrica nos transdutores para melhorar o contacto destes com as faces do provete, preenchendo certos vazios e irregularidades que possam existir, de forma a garantir a uniformização da superfície de contacto entre os transdutores e o provete;
- Os transdutores foram colocados alinhados e centrados nas faces opostas e mais afastadas do provete (figura 43 b));
- Um sinal elétrico foi enviado pelo transdutor emissor, gerando um impulso ultrassónico que atravessasse o provete. Este foi captado pelo transdutor recetor e foi novamente convertido num sinal elétrico, registado pelo aparelho;
- Foi então possível calcular a velocidade de propagação através da medição do intervalo de tempo em que a onda percorreu o provete e registou-se o valor como t_i , sendo que para cada provete obtiveram-se 3 leituras (figura 43 c)).



a) Aparelho de ultrassons.



b) Ensaio com transdutores.



c) Output de valores.

Figura 43 - Equipamento do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons.

Resultados:

Para cada leitura, obteve-se uma velocidade de propagação calculada através da equação (45), sendo que este cálculo é realizado diretamente no aparelho, sendo apenas necessário registar o seu valor, determinando-se, de seguida, o valor médio da velocidade das 3 leituras.

$$v_i = \frac{s_i}{t_i} \quad (45)$$

onde, v_i é a velocidade do impulso, s_i é o comprimento da trajetória da onda (0,160 m) e t_i é o tempo que a onda demora a percorrer a trajetória na leitura i .

4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos na campanha experimental. Este capítulo encontra-se dividido em três partes, procurando responder aos objetivos operacionais definidos no capítulo 1.

Na primeira parte, referente à primeira fase da campanha experimental, analisam-se os resultados da caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas e apresentam-se os resultados da determinação da relação A/P. A segunda e a terceira partes referem-se à segunda fase da campanha experimental, sendo que a segunda parte aborda os resultados dos ensaios das argamassas no estado fresco e a terceira parte trata os resultados dos ensaios efetuados para a caracterização física e mecânica das argamassas, no estado endurecido.

4.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E RELAÇÕES ÁGUA/PRECURSOR

4.1.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

O ensaio de análise granulométrica das areias e da borracha foi realizado conforme descrito em 3.8.2, sendo que as amostras apresentavam uma massa de 250 g. Os resultados obtidos estão resumidos nas tabelas 25 e 26 e permitem definir as curvas granulométricas dos agregados, representadas na figura 44. Sublinha-se que a amostra de borracha utilizada encontra-se no mesmo estado resultante após a trituração mecânica, pelo que ainda apresenta partículas de dimensões superiores a 4 mm.

Pela análise da figura 44 confirma-se que os resultados das distribuições granulométricas das areias obtidas através do ensaio realizado são semelhantes às distribuições granulométricas

publicadas nas fichas técnicas das areias produzidas pelo fornecedor do “Grupo SOARVAMIL”, sendo que, neste estudo, foram utilizados os valores das fichas.

Tabela 25 - Massa e percentagem de material retido nos peneiros.

Material retido nos peneiros no ensaio de distribuição granulométrica						
Peneiro [mm]	Massa de material retido nos peneiros [g]			Percentagem material retido [%]		
	Areia fina	Areia grossa	Borracha	Areia fina	Areia grossa	Borracha
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,04
8	0,0	0,3	105,8	0,0	0,1	42,3
4	0,0	4,2	105,1	0,0	1,7	42,0
2	0,3	15,3	30,5	0,1	6,1	12,2
1	2,7	58,2	6,6	1,1	23,3	2,6
0,5	48,9	105,5	1,3	19,6	42,2	0,5
0,25	140,7	57,5	0,4	56,3	23,0	0,2
0,125	55,6	7,0	0,2	22,2	2,8	0,1
0,0625	1,7	1,7	0,0	0,7	0,7	0,0
Refugo	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0
TOTAL	250	250	250	100	100	100

Tabela 26 - Percentagem de material passado nos peneiros.

Material acumulado passado no ensaio de distribuição granulométrica [%]			
Peneiro [mm]	Areia fina	Areia grossa	Borracha
31,5	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	100,0
8	100,0	99,9	57,6
4	100,0	98,2	15,6
2	99,9	92,1	3,4
1	98,8	68,8	0,8
0,5	79,2	26,6	0,2
0,25	23,0	3,6	0,1
0,125	0,7	0,8	0,0
0,0625	0,0	0,1	0,0
0	0,0	0,0	0,0

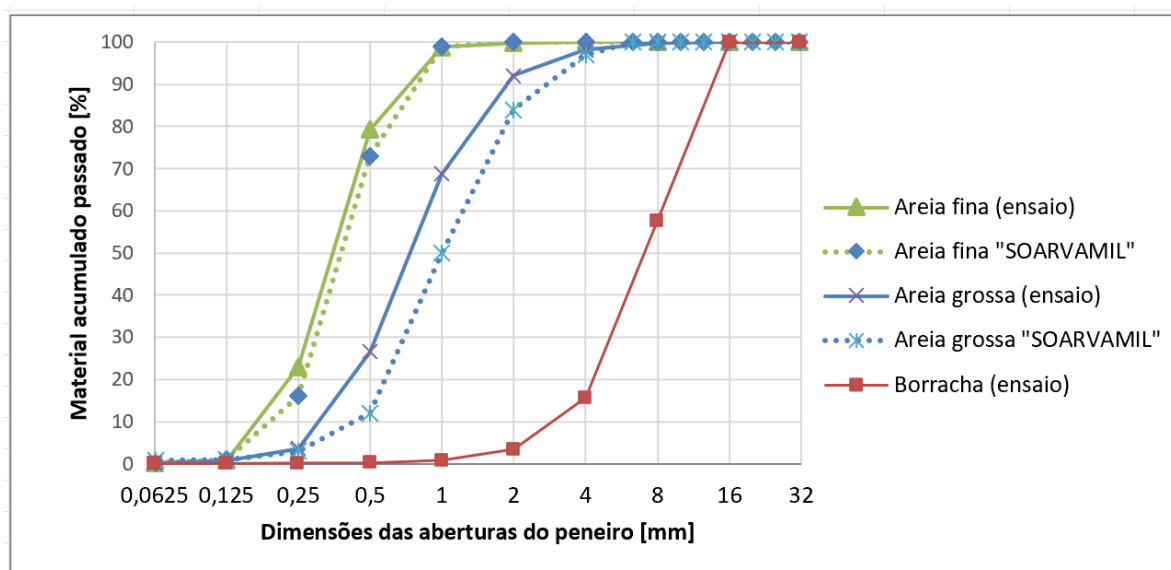


Figura 44 - Curvas granulométricas dos agregados.

Pela análise das curvas granulométricas conclui-se que a borracha apresenta uma curva granulométrica bastante diferente das curvas granulométricas das areias, o que não será benéfico para o desempenho de argamassas produzidas com substituição parcial direta da areia pela borracha. Foi por esta razão que se optou por utilizar borracha, em substituição de 5, 10 e 20% do volume da areia, peneirada e dividida em três granulometrias (0-1 mm, 1-2 mm e 2-4 mm). Deste modo, conseguiu-se que a borracha utilizada na substituição da areia se aproximasse da curva granulométrica das areias, conforme descrito em 3.2.4.

4.1.2 BARIDADE

Para os agregados de areia e borracha, bem como para os precursores de cimento e cinza volante, a baridade foi determinada experimentalmente, conforme descrito em 3.8.1. A baridade final corresponde à média de três leituras, conforme resultados dos ensaios apresentados na tabela 27.

Tabela 27 - Baridades dos agregados e precursores.

Resultados dos ensaios de baridade (Balança tarada com o vaso)				
Material	Leitura 1 [kg/m ³]	Leitura 2 [kg/m ³]	Leitura 3 [kg/m ³]	Média [kg/m ³]
Areia Fina	1484,4	1498,7	1496,8	1493,3
Areia Grossa	1514	1511,8	1517,6	1514,5
Borracha	443,9	428,2	428,7	433,6
Cimento	1032,4	1042,5	1042,3	1039,1
Cinzas Volantes	981,4	982,9	978,6	981,0

Vaso 1 L [g]	1194,6
--------------	--------

Verificou-se que a baridade da borracha, tal como esperado, é menor que a baridade da areia. Deste modo, a substituição parcial do agregado de areia por borracha resulta em argamassas mais leves.

4.1.3 MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

A determinação da massa volúmica e da absorção de água dos agregados (areias e borracha) seguiu o definido em 3.8.3, conforme registos apresentados na tabela AP 1 do Apêndice A. Releva-se que são determinados três tipos de massa volúmica para os agregados: a massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a), a massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) e a massa volúmica das partículas saturadas com superfície

seca (ρ_{ssd}). A tabela 28 apresenta os resultados das massas volúmicas e da absorção de água (WA) dos agregados, destacando-se os valores superiores das massas volúmicas das areias, em relação à borracha.

Também interessa sublinhar que, segundo o ensaio realizado, a borracha absorve mais água que a areia num período de 24 horas. No entanto, tal como a literatura defende, a borracha é hidrofóbica, pelo que a obtenção deste resultado deve-se a uma característica específica da borracha, que consiste na sua propensão para adsorver água. Esta adsorção consiste na atração que a borracha tem por manter as partículas de água na sua superfície, sem que esta água seja absorvida. Esta característica da borracha origina a obtenção de um maior valor aquando da determinação da massa da amostra saturada com superfície seca e, consequentemente, provoca a obtenção de um maior valor teórico e irreal da absorção de água da borracha.

Tabela 28 - Massas volúmicas e absorção de água dos agregados.

Resultados dos ensaios de absorção de água e massa volúmica dos agregados				
Material	ρ_a [kg/m ³]	ρ_{rd} [kg/m ³]	ρ_{ssd} [kg/m ³]	WA[%]
Areia Fina	2594,90	2574,82	2582,54	0,30
Areia Grossa	2610,52	2565,55	2582,74	0,67
Borracha	1025,54	987,84	1024,53	3,71

Apesar dos valores obtidos de massa volúmica e absorção de água das areias, considerou-se, neste estudo, uma massa volúmica de 2630 kg/m³ e uma absorção de água de 0,4% e 0,5%, para a areia fina e grossa, respetivamente, ainda que o valor apresentado nas fichas técnicas das areias seja de 0,3%. De igual modo, relativamente à absorção de água, considerou-se que aos 10 minutos (tempo da preparação da amassadura) as areias já tinham absorvido 50% e 60% da água total absorvida às 24 horas, respetivamente para a areia fina e grossa, de acordo com o estabelecido na literatura (Suescum-Morales *et al.*, 2022). Refira-se que, apesar das areias apresentarem valores de absorção de água muito baixos, os mesmos não foram desprezados na amassadura, ainda que a norma EN 1097-6:2013 refira que isso pode acontecer. Relewa-se ainda que, neste estudo, considerou-se a massa volúmica da borracha igual a 1100 kg/m³ e a absorção de água nula, conforme resulta da literatura, apesar dos valores obtidos experimentalmente.

4.1.4 RELAÇÕES ÁGUA/PRECURSOR

As relações água/precursor (A/P) foram determinadas após a realização de um total de 7 amassaduras preliminares de argamassas de referência, 3 AC e 4 AAA. Estas argamassas

foram produzidas até se atingir o espalhamento desejado de 150 ± 10 mm. Conforme já referido, a relação A/P foi estabelecida com o valor de 0,53 para a argamassa de referência de cimento (ARC) e com o valor de 0,38 para a argamassa ativada alcalinamente de referência (ARAA), conforme apresentado na tabela 29. Assim, verifica-se que, para se atingir a trabalhabilidade desejada, a AAA utiliza menos água do que a AC, sendo expectável que as primeiras resultem em argamassas mais densas, menos porosas e com maior compacidade.

Tabela 29 - Determinação da relação A/P pelo espalhamento das amassaduras preliminares.

Determinação da relação A/P das argamassas de referência pelo espalhamento de 150 ± 10 mm							
Argamassa experimental n.º	1	2	3	4	5	6	7
Tipo de argamassa	AC	AC	AC	AAA	AAA	AAA	AAA
Relação A/P	0,45	0,5	0,53	0,45	0,4	0,36	0,38
Volume [L]	1	1	1	1	1	1	1
Massa cimento [g]	430,0	430,0	430,0	-	-	-	-
Massa cinza volante [g]	-	-	-	430,0	430,0	430,0	430,0
Massa areia fina [g]	499,0	482,0	472,0	435,0	452,0	466,0	459,0
Massa areia grossa [g]	1164,0	1124,0	1100,0	1015,0	1055,0	1086,0	1070,0
Massa de água [g]	198,0	219,3	232,1	71,1	49,8	32,7	41,2
Massa de superplastificante [g]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Massa de NaOH [g]	-	-	-	51,0	51,0	51,0	51,0
Massa de Na_2SiO_3 [g]	-	-	-	199,0	199,0	199,0	199,0
Espalhamento [mm]	106,5	134,5	146	192	164	130	155

4.2 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DAS ARGAMASSAS

4.2.1 CONSISTÊNCIAS POR ESPALHAMENTO

Na segunda fase da campanha experimental, estando determinadas as relações A/P, foram produzidos 14 tipos de argamassas e, em ato contínuo, realizados os ensaios no estado fresco.

Deste modo, os resultados do ensaio da consistência por espalhamento estão apresentados na figura 45 e tabelas 30 e AP 4, verificando-se que:

- O aumento da quantidade de borracha nas AAA implica uma diminuição do espalhamento, uma vez que as partículas de borracha aumentam a viscosidade da mistura com aumento do atrito interno da mistura contendo borracha resultante da ação de bordas irregulares das partículas de borracha (Mohammadi *et al.*, 2016; Abd-Elaty *et al.*, 2022). No caso das AC, verifica-se uma variação não monotónica do espalhamento. No entanto, parece existir uma tendência para a trabalhabilidade aumentar com o aumento do teor de borracha. Na tabela 30 é apresentada uma coluna

com a média ponderada que refere o valor de variação do espalhamento em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação do espalhamento devido à borracha;

- O espalhamento das argamassas com tratamento da borracha é, no geral, ligeiramente superior às suas congêneres sem tratamento, concluindo-se que o tratamento da borracha com NaOH não tem um efeito significativo na trabalhabilidade da mistura (Mohammadi *et al.*, 2016).

Tabela 30 – Variação da consistência por espalhamento com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação do espalhamento da argamassa em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC	0,0	6,2	-8,9	↑ 0,3
AC-T/ARC	10,6	11,2	9,7	↑ 6,2
AAA/ARAA	-6,1	-14,2	-22,6	↓ -6,3
AAA-T/ARAA	-5,8	-8,1	-19,4	↓ -4,9

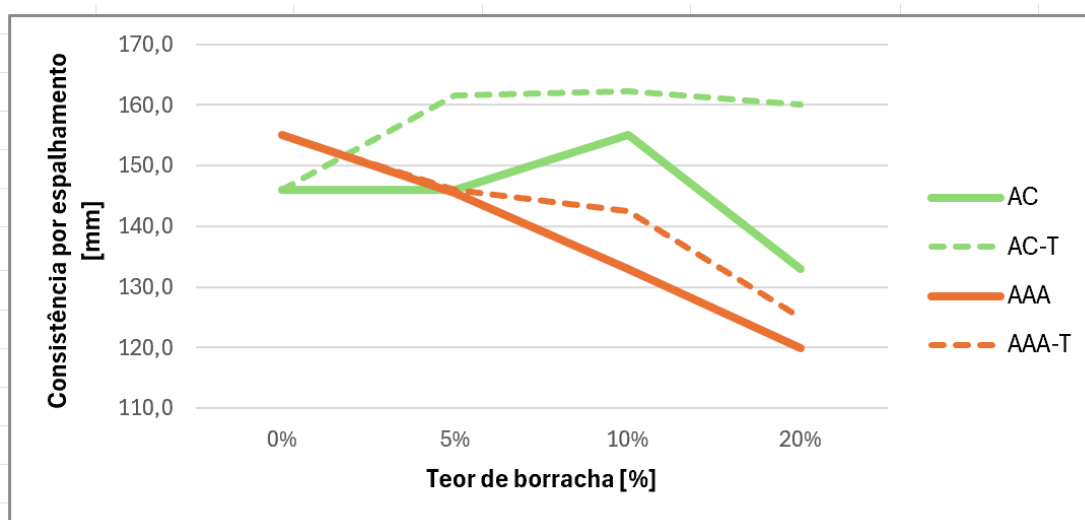


Figura 45 - Gráfico dos resultados da consistência por espalhamento das argamassas.

4.2.2 MASSA VOLUMICA DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Relativamente aos resultados do ensaio da massa volúmica (M.V.) das argamassas no estado fresco, apresentados na figura 46 e nas tabelas 31 e AP 5, verifica-se que a ARAA apresenta o valor de $2219,7 \text{ kg/m}^3$, ao passo que a ARC apresenta o valor de 2188 kg/m^3 , com uma redução de -1,43%. Constata-se que todas as argamassas de cinza volante (AAA e AAA-T) apresentam massa volúmica superior às argamassas de cimento, sendo que isto se deve ao facto das AC apresentarem um teor de água superior ao das AAA. A menor massa volúmica

da água (e a sua maior quantidade) faz reduzir a massa volúmica das AC. Na tabela 31 é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação da massa volúmica em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação da massa volúmica devido à borracha.

Tabela 31 - Variação da massa volúmica com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação da M.V. da argamassa em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC	-7,19	-10,76	-16,94	↓ -5,6
AC-T/ARC	-9,06	-13,85	-19,05	↓ -6,9
AAA/ARAA	-0,12	-2,12	-6,28	↓ -0,9
AAA-T/ARAA	-0,99	-2,15	-5,74	↓ -1,2

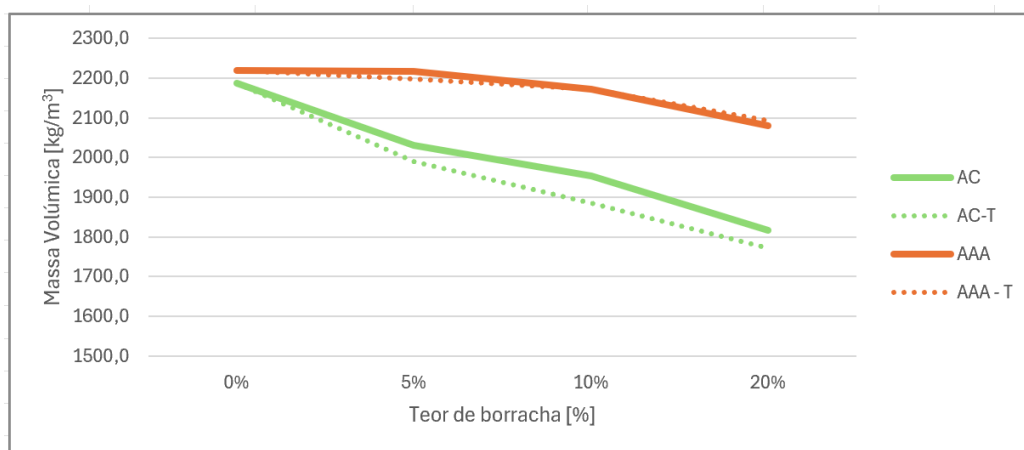


Figura 46 - Gráfico da variação das massas volúmicas das argamassas.

Analisando a tabela 31, verifica-se uma diminuição da massa volúmica à medida que aumenta o teor de borracha nas argamassas, sendo que a diminuição da massa volúmica em relação à argamassa de referência é mais acentuada nas argamassas de cimento do que nas argamassas ativadas alcalinamente. A massa volúmica da borracha é inferior à massa volúmica da areia pelo que é lógico que resulte numa tendência de redução da massa volúmica nas argamassas (Pedro et al. (2013) e Bravo e de Brito (2012)).

Verifica-se que não existem variações significativas de massa volúmica entre argamassas com borracha tratada e borracha não tratada, pelo que considera-se que o tratamento da borracha não influencia a variação da massa volúmica no estado fresco.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E FÍSICA DAS ARGAMASSAS

4.3.1 RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO (POR FLEXÃO) E À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão (R.C.) e resistência à tração por flexão (R.T.) seguiram o definido em 3.10.1, sendo que o tratamento dos dados é apresentado nas tabelas dos apêndices B1 e B2, respetivamente.

Os resultados da R.T. são resumidos na figura 47 nas tabelas 32 e AP 6. De acordo com os resultados, verifica-se que a argamassa de referência ativada alcalinamente (ARAA) apresenta valores de R.T. superiores à ARC aos 28 e 56 dias de idade (variação de 59,5 e 79,8%, respetivamente). Este resultado pode justificar-se, em parte, pela maior quantidade de água presente na ARC, que cria mais poros durante o processo de hidratação e evaporação da água, reduzindo a resistência. Por outro lado, verifica-se que se estão a comparar reações completamente distintas, verificando-se que a geopolimerização proporciona resistência superior na matriz da AAA do que as reações de hidratação ocorridas no cimento. Conforme encontrado na literatura, também se verifica que a R.T. diminui com o aumento do teor de borracha. Por exemplo, as R.T. das argamassas com 20% de borracha são 26,6 a 51,4% inferiores às da argamassa de referência. Estes resultados justificam-se pela má aderência entre a borracha e a matriz do ligante na ZTI, além da diferença de rigidez entre o agregado de areia e a borracha (Pedro *et al.* (2013) e Abd-Elaty *et al.* (2022)). Foi também possível verificar que as AAA e AAA-T apresentam sempre valores de redução inferiores, em relação às AC e AC-T. Na tabela 32 é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação da R.T. em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação da R.T. devido à borracha.

Tabela 32 - Variação da R.T. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação da R.T. em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC (28 dias)	-21,6	-23,3	-42,7	↓ -14,6
AC-T/ARC (28 dias)	-15,9	-25,6	-45,9	↓ -13,4
AC/ARC (56 dias)	-20,4	-30,7	-39,8	↓ -15,2
AC-T/ARC (56 dias)	-22,8	-39,0	-51,4	↓ -18,4
AAA /ARAA(28 dias)	-15,2	-21,5	-33,0	↓ -11,4
AAA-T/ARAA (28 dias)	-15,1	-21,3	-38,2	↓ -11,8
AAA /ARAA(56 dias)	-3,1	-28,9	-26,6	↓ -8,1
AAA-T/ARAA (56 dias)	-3,8	-22,8	-37,3	↓ -8,2

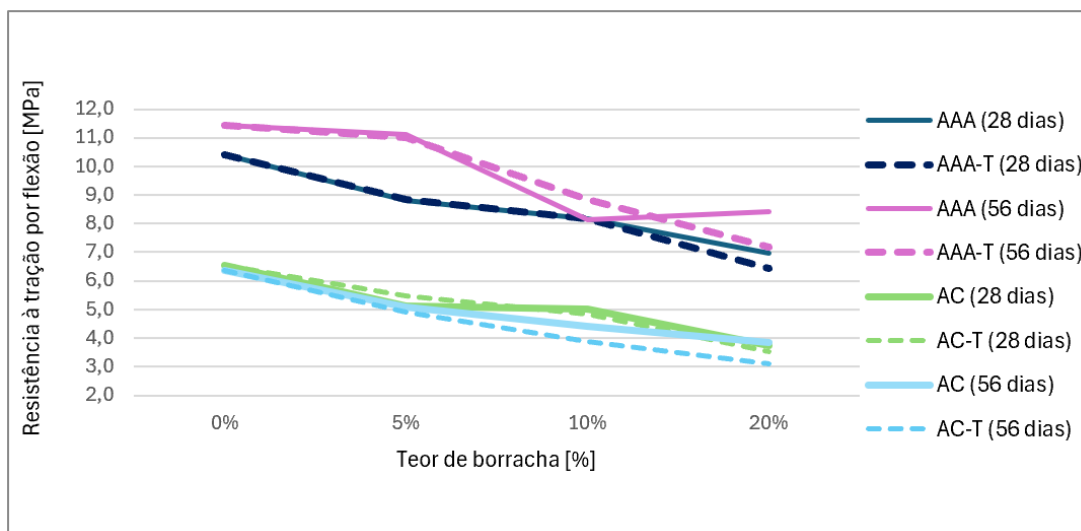


Figura 47 - Gráfico dos resultados da resistência à tração por flexão.

De acordo com a tabela 33, a R.T. reduz nas argamassas de cimento com o aumento da idade dos 28 para os 56 dias, sendo que este resultado não era esperado, podendo justificar-se pela retração que provoca microfissuras na estrutura. Por outro lado, a R.T. aumenta com a idade nas argamassas de cinzas volantes, revelando que a lentidão do processo de polimerização conduz a um aumento da resistência mais tardio do que o verificado através da hidratação do cimento. Na tabela é apresentada uma coluna com a média simples do valor de variação da R.T. em percentagem, o que permite perceber a tendência da variação da R.T. devido à idade.

Tabela 33 - Variação da R.T. com a idade da argamassa.

Variação da R.T. com a idade da argamassa [%]					
% Borracha	0%	5%	10%	20%	MÉDIA
AC (56/28 dias)	-2,42	-0,94	-11,87	2,51	↓ -3,18
AC-T (56/28 dias)	-2,42	-10,44	-19,91	-12,29	↓ -11,27
AAA (56/28 dias)	10,04	25,85	-0,40	20,55	↑ 14,01
AAA-T (56/28 dias)	10,04	24,71	8,00	11,69	↑ 13,61

Analisando os dados da tabela 34, verifica-se uma tendência de diminuição da R.T. quando se compara argamassas com borracha tratada com NaOH e argamassas com borracha sem tratamento, aos 28 e 56 dias, sendo que estes resultados são contrários aos observados na maioria da literatura. Segundo Mohammadi *et al.* (2016), esta tendência de diminuição da R.T. com a utilização do tratamento com hidróxido de sódio nos agregados de borracha pode estar relacionado com a criação de poros nas superfícies das partículas de borracha, onde bolhas de ar podem ser aprisionadas durante a preparação da mistura. Essas bolhas de ar podem permanecer na matriz do ligante e reduzir a resistência das argamassas.

Tabela 34 - Variação da R.T. com o tratamento da borracha com NaOH.

Variação da R.T. com o tratamento da borracha com NaOH [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA
AC-T/AC (28 dias)	7,27	-3,08	-5,64	↓ -0,48
AC-T/AC (56 dias)	-3,02	-11,92	-19,27	↓ -11,40
AAA-T/AAA (28 dias)	0,17	0,16	-7,86	↓ -2,51
AAA-T/AAA (56 dias)	-0,74	8,61	-14,63	↓ -2,25

Relativamente ao ensaio da resistência à compressão, os resultados são apresentados nas tabelas 35 e AP 7 e na figura 48. De acordo com os resultados, verifica-se que a ARAA apresenta valores de R.C. superiores aos da ARC aos 28 e 56 dias de idade (variação de 62,4 e 76,6%, respetivamente). Estes resultados podem justificar-se, em parte, com a maior quantidade de água presente na ARC, o que cria mais poros durante o processo de hidratação e evaporação de água, reduzindo a resistência. Por outro lado, a reação de geopolimerização proporciona resistência mais elevada na matriz de AAA. Também se verifica que a R.C. diminui com o aumento do teor de borracha. Por exemplo, a R.C. das argamassas com teor de borracha de 20% são 44,2 a 60,8% inferiores à da argamassa de referência, sendo que esta redução é atribuída às mesmas causas que justificam a redução da resistência à flexão. Assim, verifica-se que as AAA e AAA-T apresentam sempre reduções da R.C., com o aumento do teor de borracha, menores do que as reduções verificadas nas AC e AC-T, pelo que a utilização de borracha em AAA com cinzas volantes constitui uma alternativa competitiva à utilização de borracha em argamassas de cimento, em termos de resistência. Na tabela 35 é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação da R.C. em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação da R.C. devido à borracha.

Tabela 35 - Variação da R.C. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação da R.C. em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC (28 dias)	-28,8	-40,6	-59,3	↓ -21,3
AC-T/ARC (28 dias)	-23,5	-43,2	-60,8	↓ -20,1
AC/ARC (56 dias)	-33,0	-45,0	-60,5	↓ -23,5
AC-T /ARC (56 dias)	-32,5	-53,0	-65,8	↓ -25,2
AAA /ARAA(28 dias)	-16,0	-30,4	-46,6	↓ -14,3
AAA-T/ARAA (28 dias)	-12,1	-40,9	-47,5	↓ -14,8
AAA /ARAA(56 dias)	-16,6	-33,7	-44,2	↓ -14,8
AAA-T/ARAA (56 dias)	-11,2	-46,5	-50,5	↓ -15,7

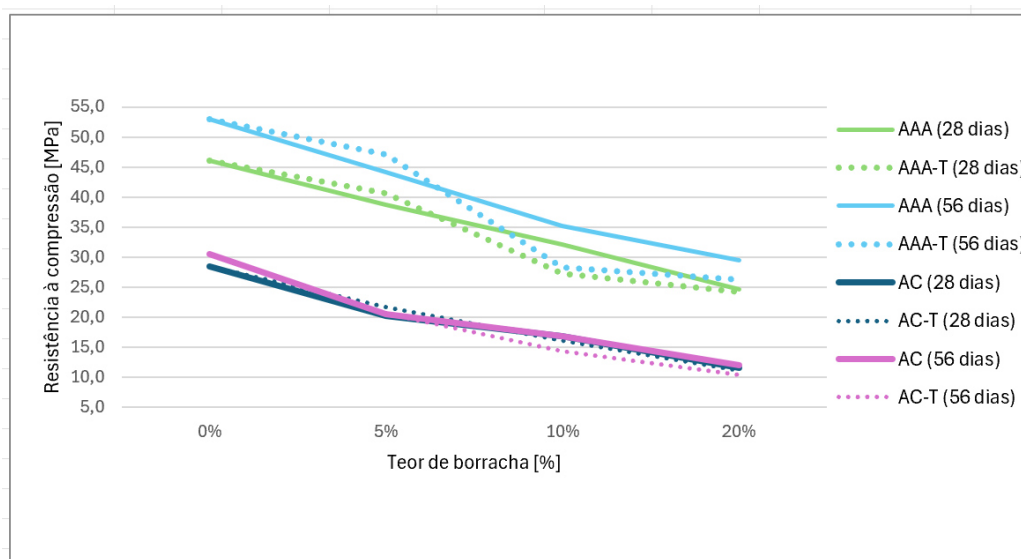


Figura 48 - Gráfico dos resultados da resistência à compressão.

De acordo com a tabela 36, verifica-se que a R.C. é praticamente idêntica na AC e AC-T com a evolução da idade de 28 para 56 dias. Por outro lado, a R.C. aumenta com a idade nas AAA e AAA-T, revelando que o processo de polimerização conduz ao aumento da resistência de forma mais tardia do que o verificado no processo de hidratação do cimento (Carvalho, 2019).

Tabela 36 - Variação da R.C. com a idade da argamassa.

Variação da R.C. com a idade da argamassa [%]					
% Borracha	0%	5%	10%	20%	MÉDIA
AC (56/28 dias)	7,53	1,16	-0,36	4,20	↑ 3,13
AC-T (56/28 dias)	7,53	-5,09	-11,08	-6,19	↓ -3,71
AAA (56/28 dias)	14,89	14,07	9,47	20,07	↑ 14,62
AAA-T (56/28 dias)	14,89	15,99	3,95	8,36	↑ 10,80

Pela análise dos dados da tabela 37, excetuando as argamassas com 5% de borracha, verifica-se uma tendência de diminuição da R.C. aos 28 e 56 dias aquando da utilização do tratamento com NaOH nas borrachas incluídas nas argamassas. Recorde-se novamente que estes resultados são contrários aos defendidos pela maioria da literatura. Assim, tal como referido relativamente à R.T. e conforme defendido por Mohammadi *et al.* (2016), acredita-se que o tratamento com hidróxido de sódio pode ter criado poros nas superfícies das partículas de borracha, onde bolhas de ar podem ser ficado aprisionadas durante a preparação da mistura, criando porosidade na matriz do ligante e, consequentemente, reduzindo a resistência. No entanto, destaque-se que este aspeto não se verificou nas argamassas com 5% de borracha.

Tabela 37 - Variação da R.C. com o tratamento da borracha com NaOH.

Variação da R.C. com o tratamento da borracha com NaOH [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA
AC-T/AC (28 dias)	7,37	-4,30	-3,84	↓ -0,26
AC-T/AC (56 dias)	0,73	-14,60	-13,43	↓ -9,10
AAA-T/AAA (28 dias)	4,65	-15,02	-1,61	↓ -3,99
AAA-T/AAA (56 dias)	6,41	-19,30	-11,20	↓ -8,03

4.3.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico (MED) seguiu o procedimento definido em 3.10.2, sendo que o tratamento dos dados é apresentado nas tabelas do apêndice B3. Tal como esperado, observa-se nessas tabelas um decréscimo da massa (devido a menor massa da borracha) e das frequências, com o aumento do teor de borracha nos provetes.

Os resultados tratados estão resumidos na figura 49 e nas tabelas 38 e AP 8. De acordo com os resultados, verifica-se que a ARAA apresenta valores de MED aos 28 e 56 dias de idade superiores aos da ARC (variação de 3,7 e 18,3%, respetivamente). Este resultado justifica-se pela maior porosidade e maior teor de ar incorporado na ARC (devido à maior relação A/P). Também se verifica que o MED diminui com o aumento do teor de borracha. Por exemplo, o MED das argamassas com 20% de borracha é 38,6 a 55,8% inferior ao da argamassa de referência, sendo que essa redução é atribuída à maior deformabilidade dos agregados de borracha (menor rigidez), ao aumento da porosidade das argamassas com borracha e ao maior teor de ar incorporado, conforme verificado por Pedro *et. al* (2013). Verifica-se que as AAA e AAA-T apresentam sempre valores superiores de MED, em relação a AC e AC-T, pelo que as argamassas de cimento têm maior tenacidade.

Na tabela 38 é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação do MED em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação do MED devido à borracha.

Tabela 38 - Variação do MED com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação do MED em relação à arg. de referência [%]					
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.	
AC/ARC (28 dias)	-16,6	-32,7	-50,2	↓	-15,2
AC-T/ARC (28 dias)	-16,1	-29,9	-48,3	↓	-14,4
AC/ARC (56 dias)	-21,9	-34,8	-53,5	↓	-17,6
AC-T/ARC (56 dias)	-26,3	-37,5	-55,8	↓	-19,7
AAA /ARAA(28 dias)	-13,3	-26,7	-39,0	↓	-12,1
AAA-T/ARAA (28 dias)	-14,7	-21,8	-38,6	↓	-11,7
AAA /ARAA(56 dias)	-7,2	-31,6	-38,9	↓	-10,9
AAA-T/ARAA (56 dias)	-18,8	-32,1	-43,8	↓	-15,2

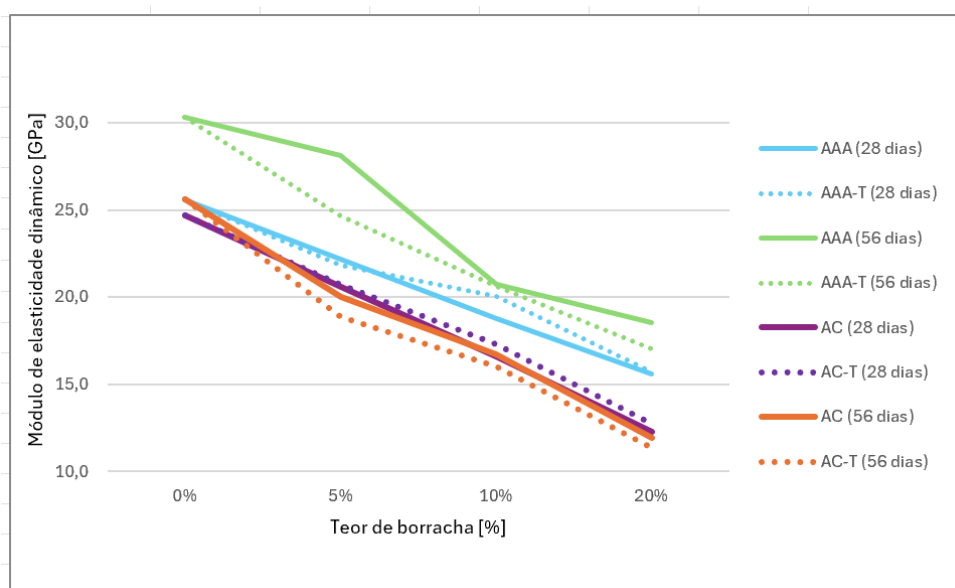


Figura 49 - Gráfico dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico.

De acordo com a tabela 39, o MED reduz ligeiramente na AC e AC-T, com o aumento da idade dos 28 para os 56 dias, o que reflete o aumento da porosidade nesse período. Por outro lado, o MED aumenta com a idade nas AAA e AAA-T, uma vez que o processo de polimerização conduz a um aumento de resistência e da rigidez de forma mais tardia do que o processo de hidratação do cimento, conforme apresentado no estudo de Carvalho (2019).

Tabela 39 - Variação do MED com a idade da argamassa.

Variação do MED com a idade da argamassa [%]					
% Borracha	0%	5%	10%	20%	MÉDIA
AC (56/28 dias)	3,85	-2,72	0,48	-3,01	↓ -0,35
AC-T (56/28 dias)	3,85	-8,79	-7,46	-11,14	↓ -5,88
AAA (56/28 dias)	18,48	26,81	10,50	18,57	↑ 18,59
AAA-T (56/28 dias)	18,48	12,82	2,85	8,39	↑ 10,63

Pela análise dos dados presentes na tabela 40, verifica-se uma ligeira tendência de aumento do MED aos 28 dias aquando da utilização de borracha tratada com NaOH,

comparativamente com argamassas com borracha sem tratamento. Por outro lado, verifica-se uma diminuição do MED nas AC-T e AAA-T aos 56 dias, no entanto a variação é pouco significativa pelo que a análise é inconclusiva quanto à influência do tratamento de borracha com NaOH nesta propriedade.

Tabela 40 - Variação do MED com o tratamento da borracha com NaOH.

Variação do MED com o tratamento da borracha com NaOH [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA
AC-T/AC (28 dias)	0,58	4,09	3,66	↑ 2,78
AC-T/AC (56 dias)	-5,69	-4,13	-5,03	↓ -4,95
AAA-T/AAA (28 dias)	-1,58	6,71	0,70	↑ 1,95
AAA-T/AAA (56 dias)	-12,44	-0,68	-7,94	↓ -7,02

4.3.3 POROSIDADE ABERTA E MASSA VOLÚMICA

O ensaio da porosidade aberta (P.A.) e massa volúmica (M.V.) no estado endurecido seguiu o definido em 3.10.4, sendo que o tratamento dos dados é apresentado nas tabelas do apêndice C2.

Os resultados da P.A. são apresentados na figura 50 e nas tabelas 41 e AP 9. De acordo com os resultados, verifica-se que a ARC apresenta valores de P.A. aos 28 e 56 dias de idade superiores aos da ARAA (variação de 11,6 e 14,4%, respetivamente). Este resultado deve-se à maior quantidade de água utilizada na ARC, que cria mais poros durante o processo de hidratação e de evaporação da água. Por outro lado, destaca-se a maior qualidade da matriz obtida nas AAA devido à geopolimerização em comparação com a reação de hidratação do cimento. Com este ensaio, também se observa que a P.A. aumenta com o aumento do teor de borracha. Por exemplo, a P.A. das argamassas com 20% de borracha é 11,1 a 52,3% superior à da argamassa de referência. Este resultado justifica-se pela massa volúmica da borracha ser inferior à das areias, o que origina pior compactação das misturas. Refira-se que, o aumento da P.A. com a utilização de borracha observado nas AC e AC-T é muito superior ao verificado nas AAA e AAA-T, registando-se que as AC e AC-T apresentam sempre valores superiores em relação às AAA e AAA-T. Este resultado permite confirmar, tal como tinha ocorrido nos ensaios mecânicos, que pode ser mais interessante utilizar estes agregados de borracha em AAA do que em AC. Na tabela 41 é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação da P.A. em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação da P.A. devido à borracha.

Tabela 41 - Variação da P.A. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação da P.A. em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC (28 dias)	31,1	39,4	52,3	↑ 21,3
AC-T/ARC (28 dias)	29,5	37,3	47,2	↑ 20,0
AC/ARC (56 dias)	20,8	26,1	38,2	↑ 14,5
AC-T/ARC (56 dias)	26,1	35,3	44,0	↑ 18,2
AAA /ARAA(28 dias)	9,2	17,3	18,5	↑ 7,5
AAA-T/ARAA (28 dias)	5,8	11,6	20,2	↑ 5,5
AAA /ARAA(56 dias)	4,4	5,5	11,0	↑ 3,3
AAA-T/ARAA (56 dias)	2,8	11,6	16,6	↑ 4,2

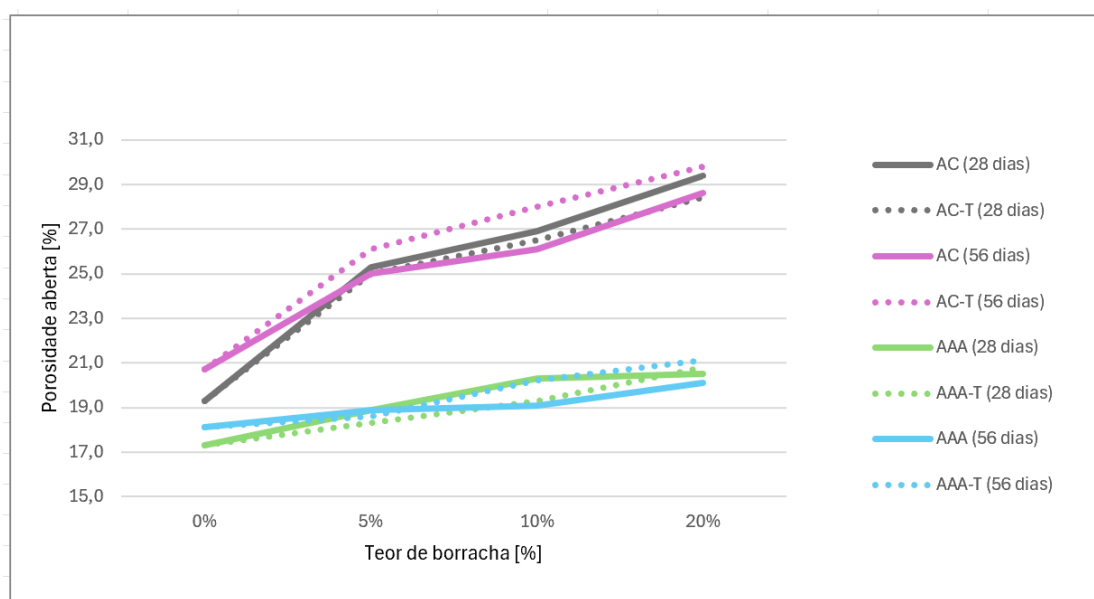


Figura 50 - Gráfico dos resultados da porosidade aberta.

De acordo com a tabela 42, a P.A. mantém-se praticamente inalterada com o aumento da idade dos 28 para os 56 dias nas AC e AAA, o que reflete que a evolução da matriz das argamassas com borracha não tratada não influencia a P.A. Por outro lado, a P.A. aumenta ligeiramente com a idade nas AC-T e AAA-T, revelando que, o tratamento da borracha com NaOH pode aumentar a P.A. das argamassas a longo prazo.

Tabela 42 - Variação da P.A. com a idade da argamassa.

Variação da P.A. com a idade da argamassa [%]					
% Borracha	0%	5%	10%	20%	MÉDIA
AC (56/28 dias)	7,25	-1,19	-2,97	-2,72	↑ 0,09
AC-T (56/28 dias)	7,25	4,40	5,66	4,93	↑ 5,56
AAA (56/28 dias)	4,62	0,00	-5,91	-1,95	↓ -0,81
AAA-T (56/28 dias)	4,62	1,64	4,66	1,44	↑ 3,09

Pela análise dos dados da tabela 43, verifica-se uma ligeira tendência de diminuição da P.A. aos 28 dias, aquando da utilização de borracha tratada com NaOH, comparativamente com as argamassas com borracha sem tratamento. No entanto, aos 56 dias, este tratamento já

provoca um acréscimo da porosidade, sendo esse aumento maior nas AC-T do que nas AAA-T. Assim, pode-se concluir que o tratamento da borracha com NaOH parece influenciar a P.A de forma desfavorável, aumentando a porosidade.

Tabela 43 - Variação da P.A. com o tratamento da borracha com NaOH.

Variação da P.A. com o tratamento da borracha com NaOH [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA
AC-T/AC (28 dias)	-1,19	-1,49	-3,40	↓ -2,02
AC-T/AC (56 dias)	4,40	7,28	4,20	↑ 5,29
AAA-T/AAA (28 dias)	-3,17	-4,93	1,46	↓ -2,21
AAA-T/AAA (56 dias)	-1,59	5,76	4,98	↑ 3,05

Relativamente à massa volúmica no estado endurecido, os resultados são apresentados na figura 51 e nas tabelas 44 e AP 10. De acordo com os resultados, verifica-se que as ARC e ARAA apresentam valores de M.V. aos 28 e 56 dias de idade muito similares (variação de 2,6 e 2,2%, respetivamente), ainda que a ARAA apresente valores superiores. Os maiores valores de massa volúmica das AAA devem-se à menor porosidade destas argamassas, comparativamente com as AC. Também se verifica que a M.V. diminui com o aumento do teor de borracha. Por exemplo, a M.V. das argamassas com 20% de borracha é 9,3 a 18,1% inferior à da argamassa de referência, e isso deve-se ao facto de a massa volúmica da borracha ser inferior à das areias. A diminuição da M.V. é muito superior nas AC e AC-T, comparativamente ao verificado nas AAA e AAA-T. Este resultado deve-se ao facto de a utilização da borracha provocar um aumento da porosidade muito mais significativo nas AC e AC-T do que nas AAA e AAA-T. Na tabela 44 é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação da M.V. em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação da M.V. devido à borracha.

Tabela 44 - Variação da M.V. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação da M.V. em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC (28 dias)	-6,8	-10,0	-16,1	↓ -5,3
AC-T/ARC (28 dias)	-8,5	-11,9	-17,9	↓ -6,3
AC/ARC (56 dias)	-7,0	-9,6	-15,8	↓ -5,3
AC-T/ARC (56 dias)	-9,1	-12,5	-18,1	↓ -6,6
AAA /ARAA(28 dias)	-2,8	-6,2	-9,6	↓ -2,8
AAA-T/ARAA (28 dias)	-3,3	-6,0	-11,0	↓ -3,0
AAA /ARAA(56 dias)	-2,8	-4,7	-9,3	↓ -2,5
AAA-T/ARAA (56 dias)	-3,1	-5,6	-10,2	↓ -2,8

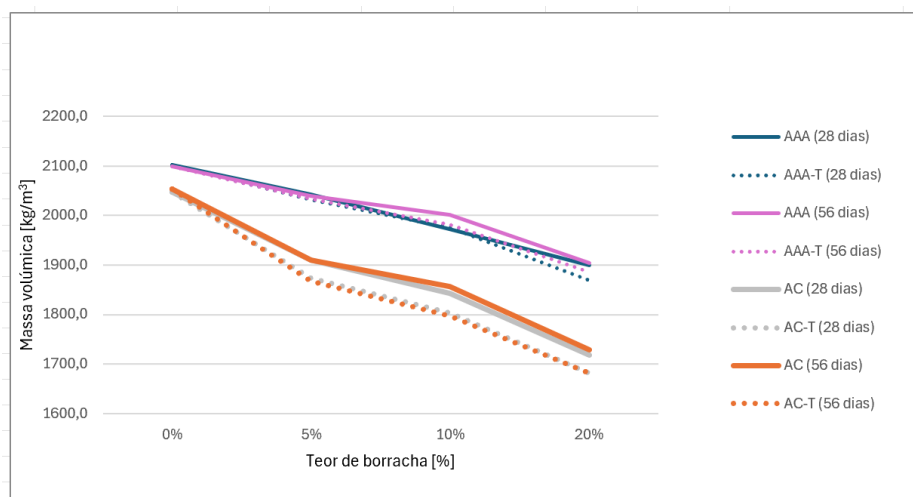


Figura 51 - Gráfico dos resultados da massa volumica no estado endurecido.

De acordo com a tabela 45, a M.V. não apresenta variação significativa com o aumento da idade dos 28 para os 56 dias em todas as argamassas, conforme resultados obtidos por Carvalho (2019).

Tabela 45 - Variação da M.V. com a idade da argamassa.

Variação da M.V. com a idade da argamassa [%]					
% Borracha	0%	5%	10%	20%	MÉDIA
AC (56/28 dias)	0,27	0,01	0,74	0,59	↑ 0,40
AC-T (56/28 dias)	0,27	-0,35	-0,38	-0,02	↓ -0,12
AAA (56/28 dias)	-0,14	-0,18	1,48	0,28	↑ 0,36
AAA-T (56/28 dias)	-0,14	0,06	0,31	0,85	↑ 0,27

Pela análise dos dados da tabela 46, verifica-se uma ligeira tendência de diminuição da M.V. aquando da utilização de borracha tratada com NaOH, sendo essa redução maior nas AC-T (28 e 56 dias) do que nas AAA-T. No entanto, as variações da M.V. são tão diminutas que se pode afirmar que o tratamento da borracha com NaOH não influencia a M.V.

Tabela 46 - Variação da M.V. com o tratamento da borracha com NaOH.

Variação da M.V. com o tratamento da borracha com NaOH [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA
AC-T/AC (28 dias)	-1,88	-2,16	-2,16	↓ -2,07
AC-T/AC (56 dias)	-2,23	-3,25	-2,76	↓ -2,75
AAA-T/AAA (28 dias)	-0,53	0,17	-1,55	↓ -0,64
AAA-T/AAA (56 dias)	-0,29	-0,98	-1,00	↓ -0,76

4.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

O ensaio da absorção de água por imersão (AAI) seguiu o definido em 3.10.3, sendo que o tratamento dos dados é apresentado nas tabelas do apêndice C1.

Os resultados tratados estão resumidos na figura 52 e nas tabelas 47 e AP 11, verificando-se que a ARAA apresenta valores de AAI aos 28 e 56 dias de idade inferiores aos da ARC (variação de 50,1 e 44,3%, respectivamente). Este resultado justifica-se pela maior porosidade e pelo maior teor de ar incorporado na ARC (devido à maior relação A/P). Também se verifica que a AAI aumenta com o aumento do teor de borracha. Por exemplo, os AAI das argamassas com 20% de borracha são 2,2 a 23,9% superiores aos da argamassa de referência, sendo que esse aumento pode ser atribuído ao aumento da porosidade das argamassas com borracha, ao maior teor de ar incorporado devido à pior compactação das argamassas mais leves (Uygunoglu e Topçu, 2010), e ao maior volume de vazios entre a borracha e a matriz cimentícia, conforme estudado por Bravo e de Brito (2012). Através da análise dos resultados, verifica-se também que as AC e as AC-T apresentam sempre valores de AAI superiores aos das AAA e AAA-T, pelo que se conclui que as argamassas de cimento absorvem mais água, o que é desvantajoso em termos de durabilidade. Na tabela 47 é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação da AAI em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação da AAI devido à borracha.

Tabela 47 - Variação da AAI com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação da AAI em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC (28 dias)	2,5	6,8	18,1	↑ 3,5
AC-T/ARC (28 dias)	0,3	1,5	2,2	↑ 0,5
AC/ARC (56 dias)	1,2	4,7	13,8	↑ 2,3
AC-T/ARC (56 dias)	0,5	7,2	8,3	↑ 2,1
AAA /ARAA(28 dias)	-0,2	3,0	3,5	↑ 0,7
AAA-T/ARAA (28 dias)	7,7	14,3	22,3	↑ 6,8
AAA /ARAA(56 dias)	0,7	6,0	11,0	↑ 2,2
AAA-T/ARAA (56 dias)	5,2	14,7	23,9	↑ 6,2

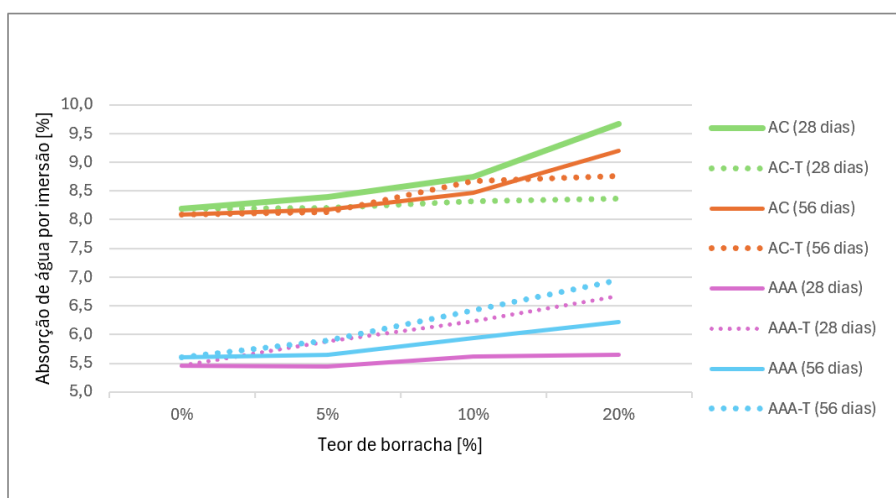


Figura 52 - Gráfico dos resultados do ensaio de AAI.

De acordo com a tabela 48, a AAI reduz ligeiramente na AC, com o aumento da idade de 28 para 56 dias. Por outro lado, a AAI aumenta com a idade nas AC-T, AAA e AAA-T, sendo que esta tendência está de acordo com os resultados obtidos por Martins (2008).

Tabela 48 - Variação da AAI com a idade da argamassa.

Variação da AAI com a idade da argamassa [%]					
% Borracha	0%	5%	10%	20%	MÉDIA
AC (56/28 dias)	-1,29	-2,53	-3,24	-4,87	↓ -2,98
AC-T (56/28 dias)	-1,29	-1,05	4,22	4,66	↑ 1,64
AAA (56/28 dias)	2,71	3,69	5,69	10,19	↑ 5,57
AAA-T (56/28 dias)	2,71	0,36	3,01	4,02	↑ 2,52

Pela análise dos dados da tabela 49, verifica-se uma ligeira tendência de diminuição da AAI aos 28 e 56 dias com a utilização do tratamento da borracha nas AC. Por outro lado, verifica-se um aumento da AAI aos 28 e 56 dias nas AAA-T, podendo-se concluir que o tratamento da borracha com NaOH influencia desfavoravelmente a AAI nas AAA, proporcionando argamassas com maior porosidade. Este efeito negativo pode-se dever à ocorrência de uma reação negativa acrescida entre o NaOH, utilizado como ativador alcalino, e a borracha da argamassa.

Tabela 49 - Variação da AAI com o tratamento da borracha com NaOH.

Variação da AAI com o tratamento da borracha com NaOH [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA
AC-T/AC (28 dias)	-2,17	-4,95	-13,46	↓ -6,86
AC-T/AC (56 dias)	-0,68	2,37	-4,78	↓ -1,03
AAA-T/AAA (28 dias)	7,94	10,98	18,23	↑ 12,38
AAA-T/AAA (56 dias)	4,46	8,16	11,61	↑ 8,08

4.3.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio da absorção de água por capilaridade (AAC) seguiu o definido em 3.10.5, permitindo determinar o coeficiente de absorção de água e o valor assintótico, sendo que o tratamento dos dados é apresentado nas tabelas do apêndice C3.

Os resultados do coeficiente capilar (C.C.) estão resumidos na figura 53 nas tabelas 50 e AP 12, verificando-se que, aos 28 dias de idade, a ARC apresenta valores de C.C. superiores aos da ARAA (variação de 13,2%). No entanto, verifica-se o contrário aos 56 dias, onde a ARAA apresenta valores de C.C. superiores aos da ARC (variação de 11,9%). Também se verifica uma tendência de diminuição do C.C. com o aumento do teor de borracha, exceto nos casos da AC-T aos 28 dias e da AAA-T aos 56 dias. Esta diminuição pode ser atribuída à hidrofobia da borracha (Segre e Joeques, 2000), pelo que a saturação do provete é mais lenta. Na tabela 50 é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação

da AAI em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação do C.C. devido à borracha.

Tabela 50 - Variação do C.C. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação do C.C. em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC (28 dias)	-34,9	-53,5	-55,8	↓ -25,2
AC-T/ARC (28 dias)	27,9	41,9	9,3	↑ 17,1
AC/ARC (56 dias)	-57,6	-69,5	-69,5	↓ -36,6
AC-T/ARC (56 dias)	-61,0	-44,1	-59,3	↓ -32,6
AAA /ARAA(28 dias)	-31,6	-50,0	-55,3	↓ -23,5
AAA-T/ARAA (28 dias)	-21,1	-28,9	-47,4	↓ -15,8
AAA /ARAA(56 dias)	-25,8	-36,4	-59,1	↓ -19,6
AAA-T/ARAA (56 dias)	-13,6	-12,1	-4,5	↓ -6,9

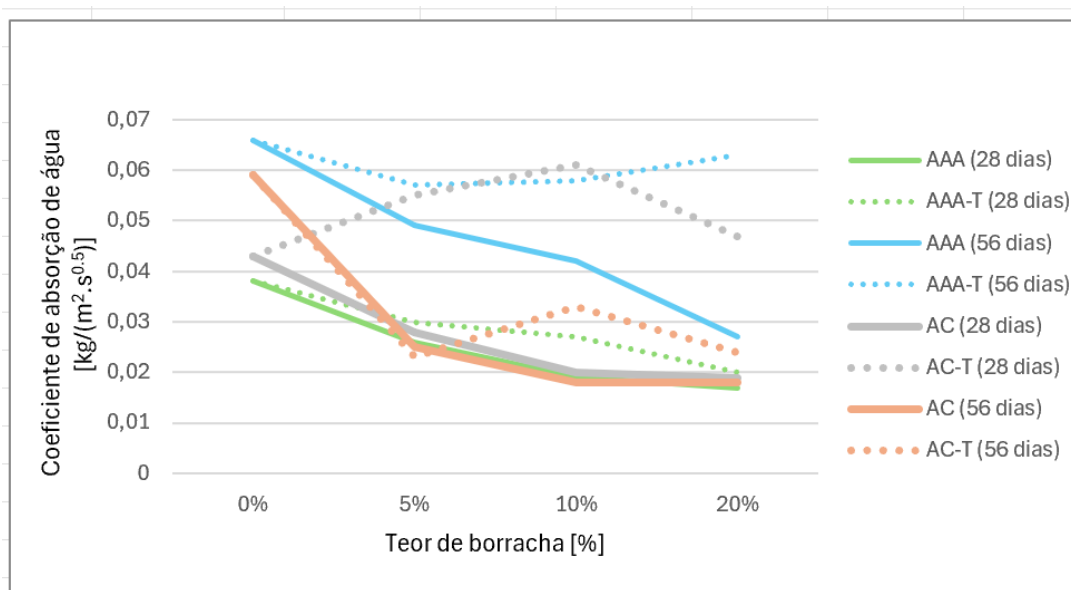


Figura 53 - Gráfico dos resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

De acordo com a tabela 51, nas argamassas de cimento o C.C. reduz com o aumento da idade de 28 para 56 dias. Por outro lado, o C.C. aumenta consideravelmente com a idade nas argamassas de cinzas volantes.

Tabela 51 - Variação do C.C. com a idade da argamassa.

Variação do C.C. com a idade da argamassa [%]					
% Borracha	0%	5%	10%	20%	MÉDIA
AC (56/28 dias)	37,21	-10,71	-10,00	-5,26	↑ 2,81
AC-T (56/28 dias)	37,21	-58,18	-45,90	-48,94	↓ -28,95
AAA (56/28 dias)	73,68	88,46	121,05	58,82	↑ 85,51
AAA-T (56/28 dias)	73,68	90,00	114,81	215,00	↑ 123,37

Pela análise dos dados da tabela 52, verifica-se uma tendência de aumento do C.C. em todas as argamassas, com a utilização de tratamento na borracha com NaOH, principalmente na argamassa de cimento aos 28 dias.

Tabela 52 - Variação do C.C. com o tratamento da borracha com NaOH.

Variação do C.C. com o tratamento da borracha com NaOH [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA
AC-T/AC (28 dias)	96,43	205,00	147,37	↑149,60
AC-T/AC (56 dias)	-8,00	83,33	33,33	↑36,22
AAA-T/AAA (28 dias)	15,38	42,11	17,65	↑25,05
AAA-T/AAA (56 dias)	16,33	38,10	133,33	↑62,59

Os resultados do valor assintótico (V.A.) da absorção de água por capilaridade estão resumidos na figura 54 e nas tabelas 53 e AP 13, verificando-se que, aos 28 e 56 dias de idade, a ARC apresenta valores de V.A. superiores aos da ARAA (variação de 49,2 e 33,7%, respetivamente). Este resultado pode ser justificado pela maior porosidade das argamassas de cimento devido à maior relação A/P. Na tabela 53, também se verifica uma tendência de diminuição do V.A. aos 28 e 56 dias com o aumento do teor de borracha nas AC e AC-T. Uma vez que existe um aumento da porosidade nessas argamassas com o aumento do teor de borracha, este resultado deve-se justificar pelo facto das partículas de borracha não absorverem água (Segre e Joekes, 2000). Em sentido contrário, verifica-se que o V.A. aos 28 e 56 dias aumenta com o aumento do teor de borracha nas AAA e AAA-T, sendo que essa variação pode-se dever ao aumento da porosidade. Nessa tabela é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação do V.A. em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação do V.A. devido à borracha.

Tabela 53 - Variação do V.A. com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação do V.A. em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC (28 dias)	-11,4	-16,1	-21,3	↓ -8,3
AC-T/ARC (28 dias)	-19,0	-16,7	-35,9	↓ -12,1
AC/ARC (56 dias)	-6,7	-17,7	-17,9	↓ -6,7
AC-T/ARC (56 dias)	-14,5	-4,3	-17,1	↓ -7,0
AAA /ARAA(28 dias)	8,6	8,8	11,4	↑ 5,3
AAA-T/ARAA (28 dias)	9,2	9,2	10,1	↑ 5,4
AAA /ARAA(56 dias)	6,3	2,4	5,3	↑ 2,9
AAA-T/ARAA (56 dias)	6,1	4,9	8,3	↑ 3,5

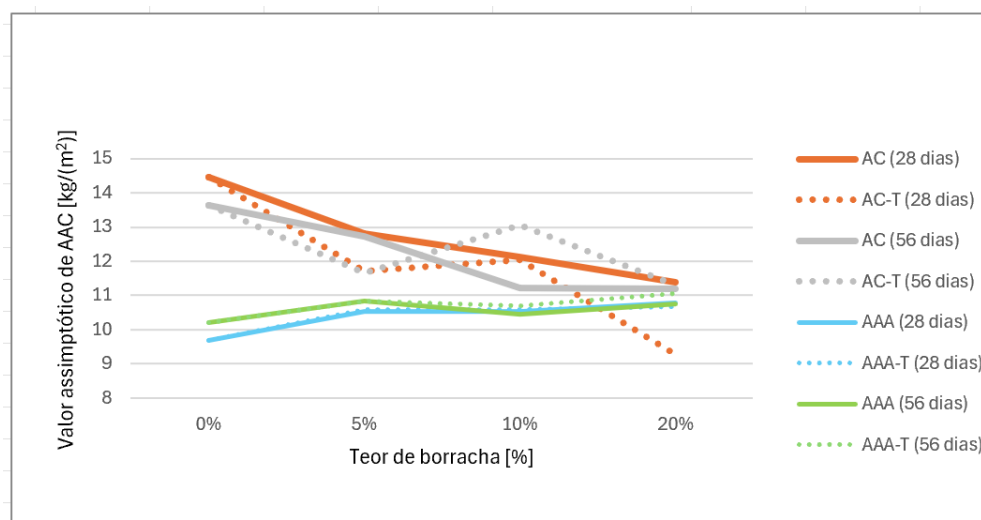


Figura 54 - Gráfico dos resultados do valor assintótico de absorção de água por capilaridade.

De acordo com a tabela 54, o V.A. reduz na AC, com a variação da idade de 28 para 56 dias. Por outro lado, o V.A. aumenta com a variação da idade nas AC-T, AAA e AAA-T.

Tabela 54 - Variação do V.A. com a idade da argamassa.

Variação do V.A. com a idade da argamassa [%]					
% Borracha	0%	5%	10%	20%	MÉDIA
AC (56/28 dias)	-5,60	-0,62	-7,42	-1,49	↓ -3,78
AC-T (56/28 dias)	-5,60	-0,34	8,47	22,01	↑ 6,13
AAA (56/28 dias)	5,37	3,14	-0,76	-0,37	↑ 1,84
AAA-T (56/28 dias)	5,37	2,36	1,23	3,66	↑ 3,15

Pela análise dos dados da tabela 55, verifica-se uma tendência de diminuição do V.A. aos 28 dias nas AC-T com a utilização de tratamento da borracha com NaOH. No entanto, verifica-se uma tendência de ligeiro aumento do V.A. aos 56 dias nas AC-T e AAA-T.

Tabela 55 - Variação do V.A. com o tratamento da borracha com NaOH.

Variação do V.A. com o tratamento da borracha com NaOH [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA
AC-T/AC (28 dias)	-8,59	-0,74	-18,54	↓ -9,29
AC-T/AC (56 dias)	-8,33	16,30	0,89	↑ 2,95
AAA-T/AAA (28 dias)	0,57	0,38	-1,11	↓ -0,05
AAA-T/AAA (56 dias)	-0,18	2,39	2,88	↑ 1,70

4.3.6 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

O ensaio da velocidade de propagação de ultrassons (VPU) seguiu o definido em 3.10.6, sendo que o tratamento dos dados é apresentado nas tabelas do apêndice C4.

De acordo com os resultados apresentados na figura 55 e nas tabelas 56 e AP 14, verifica-se que as ARC e ARAA apresentam valores de VPU, aos 28 e 56 dias de idade, com variação máxima de 2,7%. Também se verifica que a VPU diminui com o aumento do teor de borracha,

sendo que isso pode-se dever ao menor módulo de elasticidade da borracha e às dificuldades na compactação das misturas contendo maior volume de partículas de borracha, resultando em maior porosidade e teor de ar, conforme estudado por Uygunoglu e Topçu (2010) e Souza (2019). A redução da VPU com o aumento do teor de borracha é inferior nas AAA e AAA-T, comparativamente com as AC e AC-T, existindo correlação com a resistência à compressão do material (Neves, 2022).

As AAA e AAA-T (56 dias) apresentam os maiores resultados de VPU, ao passo que as AC e AC-T (56 dias) obtiveram os menores resultados de VPU, concluindo-se que as argamassas de cinzas volantes têm uma estrutura ligeiramente mais densa e homogênea, provavelmente devido à menor relação A/P, bem como a reação de polimerização conduzir à formação de uma matriz de maior qualidade de AAA. Na tabela 56 é apresentada uma coluna com a média ponderada que refere o valor de variação da VPU em relação à argamassa de referência por cada 5% de substituição por borracha, o que permite perceber a tendência da variação da VPU devido à borracha.

Tabela 56 - Variação da VPU com a percentagem de borracha em relação à argamassa de referência.

Variação da VPU em relação à arg. de referência [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA P.
AC/ARC (28 dias)	-5,6	-10,0	-14,0	↓-4,7
AC-T/ARC (28 dias)	-6,8	-12,4	-17,2	↓-5,8
AC/ARC (56 dias)	-8,6	-11,7	-18,7	↓-6,4
AC-T/ARC (56 dias)	-7,1	-11,2	-18,1	↓-5,8
AAA /ARAA(28 dias)	-3,7	-5,7	-11,2	↓-3,1
AAA-T/ARAA (28 dias)	-2,5	-6,3	-12,9	↓-3,0
AAA /ARAA(56 dias)	-3,0	-5,6	-10,4	↓-2,8
AAA-T/ARAA (56 dias)	-2,6	-6,1	-12,3	↓-2,9

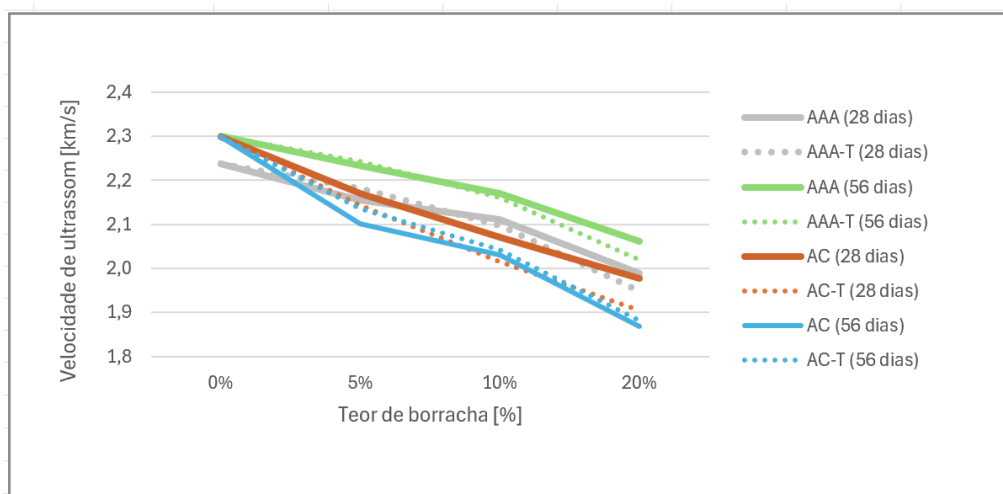


Figura 55 - Gráfico dos resultados do ensaio VPU.

De acordo com a tabela 57, a velocidade de ultrassons aumenta com o aumento da idade de 28 para 56 dias nas AAA e AAA-T, à semelhança da resistência à compressão. Este resultado reflete a evolução da matriz destas argamassas ao longo do tempo, provando que estas se vão tornando mais densas, o que justifica a evolução do módulo de elasticidade dinâmico, conforme estudado por Carvalho (2019). Pelo contrário, a velocidade de ultrassons diminui com a idade nas AC e AC-T, revelando que a evolução da matriz nestas argamassas ocorre mais cedo (até aos 28 dias). Sublinha-se que as variações em todos os casos são muito diminutas.

Tabela 57 - Variação da VPU com a idade da argamassa.

Variação da VPU com a idade da argamassa [%]					
% Borracha	0%	5%	10%	20%	MÉDIA
AC (56/28 dias)	0,00	-3,22	-1,93	-5,56	↓ -2,68
AC-T (56/28 dias)	0,00	-0,37	1,29	-1,16	↓ -0,06
AAA (56/28 dias)	2,82	3,62	2,89	3,72	↑ 3,26
AAA-T (56/28 dias)	2,82	2,80	3,00	3,59	↑ 3,05

Pela análise dos dados da tabela 58, verifica-se uma ligeira tendência de diminuição da VPU, tanto aos 28 como aos 56 dias de idade, com a utilização de borracha tratada com NaOH, sendo esta redução tanto maior quanto maior for o teor de borracha, excetuando-se o caso da AC-T (56 dias) em que se verifica um ligeiro aumento. No entanto, as variações de VPU são tão diminutas que se pode afirmar que o tratamento da borracha com NaOH não influencia a velocidade de ultrassons.

Tabela 58 - Variação da VPU com o tratamento da borracha com NaOH.

Variação da VPU com o tratamento da borracha com NaOH [%]				
% Borracha	5%	10%	20%	MÉDIA
AC-T/AC (28 dias)	-1,29	-2,66	-3,74	↓ -2,56
AC-T/AC (56 dias)	1,62	0,54	0,75	↑ 0,97
AAA-T/AAA (28 dias)	1,21	-0,57	-1,96	↓ -0,44
AAA-T/AAA (56 dias)	0,40	-0,46	-2,09	↓ -0,71

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De acordo com o artigo 141.º do Estatuto da Ordem dos Engenheiros é dever do engenheiro defender o ambiente e os recursos naturais, comprometendo-se a desenvolver e implementar sistemas tecnológicos sustentáveis e adequados aos fins em vista (Ordemengenheiros, 2024). Assim, esta investigação foi motivada pela necessidade de encontrar soluções que permitam a reciclagem de produtos como a borracha de pneus usados e as cinzas volantes, tendo em conta que a indústria da construção coloca problemas de sustentabilidade e é uma das maiores consumidoras de recursos naturais.

Segundo Neves (2022), a indústria da construção é uma das principais emissoras de dióxido de carbono (CO_2) e consumidora de recursos naturais e energia, pelo que surge uma preocupação ambiental associada ao seu crescimento. Os betões ativados alcalinamente poderão vir a ser uma alternativa ao betão tradicional com cimento Portland, atingindo resistências competitivas e, acima de tudo, demonstrando ser um betão com menor “pegada ecológica”, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e da energia. Por outro lado, a incorporação de agregados de borracha nos betões/argamassas também poderá introduzir ganhos ao nível ambiental e económico.

Nesta dissertação, foram investigadas experimentalmente as propriedades de 14 tipos de argamassas, aos 28 e 56 dias, com a produção de um total de 84 provetes, desde argamassas de controlo/referência até argamassas incorporando borracha de pneus usados, de acordo com a campanha experimental definida no capítulo 3. Assim, foram utilizadas partículas de borracha para substituir 5%, 10% e 20% em volume do agregado fino e também foi utilizado um método de tratamento com NaOH para se estudar se a interface entre a borracha e o precursor melhora. Na introdução, foram definidos os objetivos propostos para esta investigação, pelo que nesta fase apresentam-se as conclusões gerais com base em resultados que as suportam e respondem aos objetivos traçados.

5.1 ANÁLISE DO TRABALHO REALIZADO

Relativamente aos objetivos operacionais definidos para a caracterização física dos materiais e determinação das relações A/P verificou-se que, na primeira fase da campanha experimental, foram cumpridas estas metas, resultando que a relação A/P da ARAA, necessária para se atingir a trabalhabilidade definida, é inferior à da ARC.

Quanto ao objetivo de avaliação da influência da taxa de substituição de areia por borracha nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas, verificam-se os resultados médios resumidos na tabela 59, cujos valores são a média ponderada geral dos resultados aos 28 e 56 dias, em percentagem, da variação de AC e AC-T ou AAA e AAA-T em relação à ARC ou ARAA, respetivamente, por cada 5% de substituição de areia por borracha.

Tabela 59 - Variação dos resultados devido à influência da borracha.

Influência nas propriedades das argamassas por cada 5% de teor de borracha [%]			
Tipo de Argamassa e Relação	(AC e AC-T)/ARC	(AAA e AAA-T)/ARAA	
Propriedades mecânicas			
Resistência à flexão	↓ -15,40	↓ -9,85	
Resistência à compressão	↓ -22,52	↓ -14,89	
Módulo de elasticidade dinâmico	↓ -16,69	↓ -12,51	
Propriedades físicas			
Absorção de água por imersão	↑ 2,09	↑ 3,96	
Porosidade aberta	↑ 18,49	↑ 5,15	
Massa volúmica	↓ -5,86	↓ -2,78	
Coefficiente de absorção de água por capilaridade	↓ -19,33	↓ -16,44	
Valor assintótico	↓ -8,51	↑ 4,29	
Velocidade de propagação de ultrassons	↓ -5,64	↓ -2,94	

De acordo com a tabela anterior, verifica-se que, em todas as propriedades, a tendência da variação devido à influência da utilização de borracha é semelhante nas AC e AAA, levando a uma pioria dos resultados, exceto no valor assintótico da absorção de água por capilaridade. Para esta última, a incorporação de borracha leva a um aumento deste valor nas AAA e à diminuição nas AC. Ao nível das propriedades mecânicas, com o aumento do teor de borracha, verifica-se uma redução inferior dos valores nas argamassas ativadas alcalianamente (AAA e AAA-T), comparativamente com as argamassas de cimento (AC e AC-T). Ao nível da porosidade aberta verifica-se que as argamassas de cimento apresentam um aumento bastante superior da porosidade devido à borracha do que no caso das argamassas ativadas alcalinamente. Destaque-se também que a introdução de borracha nas argamassas é vantajosa para a produção de argamassas/betões sustentáveis com maior tenacidade e para aplicações com exigências ao nível da resistência ao choque.

No que respeita ao objetivo operacional relativo à avaliação da influência da idade nas propriedades das argamassas, obtiveram-se os resultados resumidos na tabela 60, cujos valores são a média geral, em percentagem, da variação entre os 28 e os 56 dias das AC e AC-T ou AAA e AAA-T.

Tabela 60 - Variação dos resultados das propriedades devido à influência da idade das argamassas.

Influência da idade nas propriedades das argamassas [%]		
Tipo de Argamassa e Relação (56/28 dias)	AC e AC-T	AAA e AAA-T
Propriedades mecânicas		
Resistência à flexão	↓ -7,22	↑ 13,81
Resistência à compressão	↓ -0,29	↑ 12,71
Módulo de elasticidade dinâmico	↓ -3,11	↑ 14,61
Propriedades físicas		
Absorção de água por imersão	↓ -0,67	↑ 4,04
Porosidade aberta	↑ 2,82	↑ 1,14
Massa volúmica	↑ 0,14	↑ 0,31
Coefficiente de absorção de água por capilaridade	↓ -13,07	↑ 104,44
Valor assintótico	↑ 1,17	↑ 2,49
Velocidade de propagação de ultrassons	↓ -1,37	↑ 3,15

De acordo com a tabela anterior, conclui-se que a variação dos resultados das propriedades entre os 28 e os 56 dias nas argamassas de cimento (AC e AC-T) é praticamente irrelevante, entendendo-se que a evolução da matriz de cimento não é significativa entre essas idades. No entanto, as argamassas ativadas alcalinamente (AAA e AAA-T) apresentam valores mais elevados aos 56 dias, o que demonstra uma evolução significativa da matriz de cinzas volantes nesse período, responsável pela melhoria da resistência mas também do agravamento da porosidade.

Quanto ao objetivo operacional referente à avaliação do tratamento da borracha com solução de hidróxido de sódio nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas de cimento ou cinza volante, obtiveram-se os resultados resumidos na tabela 61, cujos valores são a média geral dos resultados aos 28 e 56 dias, em percentagem, da variação das AC-T ou AAA-T em relação às AC ou AAA, respetivamente.

Tabela 61 - Variação dos resultados devido à influência do tratamento da borracha com NaOH.

Influência do tratamento de borracha com NaOH nas propriedades [%]		
Tipo de Argamassa e Relação	AC-T/AC	AAA-T/AAA
Propriedades mecânicas		
Resistência à flexão	↓ -5,94	↓ -2,38
Resistência à compressão	↓ -4,68	↓ -6,01
Módulo de elasticidade dinâmico	↓ -1,08	↓ -2,53
Propriedades físicas		
Absorção de água por imersão	↓ -3,94	↑ 10,23
Porosidade aberta	↑ 1,63	↑ 0,42
Massa volúmica	↓ -2,41	↓ -0,70
Coefficiente de absorção de água por capilaridade	↑ 92,91	↑ 43,82
Valor assintótico	↓ -3,17	↑ 0,82
Velocidade de propagação de ultrassons	↓ -0,80	↓ -0,58

Segundo os valores apresentados na tabela, conclui-se que o tratamento da borracha com NaOH não melhorou as propriedades mecânicas das argamassas, ao contrário do que é apresentado na maioria da literatura. Esta diminuição qualitativa dos valores médios pode ocorrer devido à criação de poros nas superfícies das partículas de borracha através do tratamento com hidróxido de sódio. Assim, podem-se formar bolhas de ar que posteriormente podem permanecer na matriz do ligante, reduzindo a resistência, conforme defendido por Mohammadi *et al.* (2016). No entanto, ressalve-se que a variação dos valores médios é inferior a 10%, pelo que a influência do tratamento da borracha é pouco expressiva, exceto no caso do coeficiente de absorção de água por capilaridade. Da presente investigação resulta que, não é viável realizar o tratamento da borracha nestas condições, pelo que deve ser aprofundada a investigação em trabalhos futuros utilizando partículas de borracha de maiores dimensões ou outras durações de tratamento.

Agora, de forma global, interessa comparar o desempenho das argamassas ativadas alcalinamente com as argamassas de cimento ao nível das várias propriedades em estudo, tendo sido obtidos os valores apresentados na tabela 62 e que resultam da média dos resultados de todos os ensaios para cada propriedade.

Tabela 62 - Valor médio das propriedades das argamassas e relação AAA/AC.

Valor médio das propriedades das argamassas e relação AAA/AC			
Tipo de Argamassa e Relação	AC	AAA	AAA/AC [%]
Propriedades mecânicas			
Resistência à flexão [Mpa]	4,92	9,11	↑ 85,17
Resistência à compressão [Mpa]	19,40	37,29	↑ 92,23
Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]	18,48	22,23	↑ 20,28
Propriedades físicas			
Absorção de água por imersão [%]	8,48	5,92	↓ -30,19
Porosidade aberta [%]	25,32	19,18	↓ -24,24
Massa volúmica [kg/m ³]	1866,99	2002,28	↑ 7,25
Coefficiente de absorção por capilaridade [kg/(m ² .s ^{0.5})]	0,036	0,040	↑ 11,11
Valor assintótico [kg/m ²]	12,30	10,51	↓ -14,55
Velocidade de propagação de ultrassons [km/s]	2,10	2,15	↑ 2,72

Assim, conclui-se que as AAA poderão revelar-se uma alternativa sustentável em relação às AC, considerando que apresentam maiores resistências à flexão e à compressão, maior módulo de elasticidade dinâmico, maior velocidade de propagação de ultrassons, menor absorção de água por imersão, menor porosidade aberta e menor valor assintótico por capilaridade. Em sentido contrário, as AAA apresentam resultados desfavoráveis em relação às AC apenas ao nível da maior massa volúmica no estado endurecido e maior coeficiente de absorção de água por capilaridade, conforme valores da variação AAA/AC, em percentagem, apresentados na tabela.

Por último, importa referir que se espera que a aprovação e divulgação desta dissertação possa revelar-se útil para que outros investigadores possam analisar os resultados apresentados e utilizá-los na elaboração de outros estudos, investigando, por exemplo, os aspetos como os que se apresentam de seguida.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Segundo Sescum-Morales *et al.* (2022), as cinzas volantes e as escórias de alto-forno têm sido considerados como os principais precursores de argamassas ou betões ativados alcalinamente, existindo já muita investigação com esses materiais. No entanto, a utilização de fontes de energia renováveis para a produção de energia e a preferência dos fornos elétricos a arco em detrimento dos altos-fornos, devido à sua maior eficiência na reciclagem de metais ferrosos, conduziram a uma produção inferior de cinzas volantes e escória de alto forno, respetivamente. De acordo com Neves (2022), o futuro das cinzas volantes pode vir a estar comprometido, visto que o Acordo de Paris (ONU), assinado em dezembro de 2015, visa alcançar a descarbonização das economias mundiais e limitar o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C até 2050, pelo que o cumprimento desta medida afeta diretamente a produção das cinzas volantes. Desta forma, o Governo da República Portuguesa decretou o encerramento das centrais de produção de energia a carvão até 2030, sendo que em novembro de 2021, com o esgotamento do carvão existente na central termoelétrica do Pego, Portugal deixou de produzir energia através do carvão. Com o fim da queima do carvão, acaba a produção de cinzas volantes, o que compromete a sua disponibilidade para a indústria de betão pronto.

Tendo em consideração o anterior, prevê-se que em futuras investigações seja necessário aprofundar (i) o estudo de outros precursores em argamassas ou betões ativados alcalinamente (ii) com (ou sem) borracha de pneus usados, (iii) tratada e sem tratamento, para estudar a viabilidade dessas soluções sustentáveis. Nessas investigações interessa definir uma aplicação alvo e definir composições e campanhas experimentais de acordo com a aplicação (por exemplo, betão não estrutural para pavimentos pré-fabricados).

Adicionalmente, na sequência deste trabalho preconiza-se a realização de outras investigações que visem o estudo (i) de argamassas ativadas alcalinamente com borracha tratada com NaOH durante diferentes períodos além dos 30 minutos, ou até mesmo (ii) o desenvolvimento de um estudo semelhante mas em betões e com a utilização de agregados grossos de borracha.

REFERÊNCIAS

LIVROS, TESES E ARTIGOS:

- Abd-Elaty, M., Ghazy, M., Khalifa, O. (2022). *Mechanical and thermal properties of fibrous rubberized geopolymer mortar*. Construction and building materials, Vol. 354. pp.1-15.
- Anjos, M. (2009). *Tese de Doutorado intitulada “Adição de resíduo de biomassa de cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados”* apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharias de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. pp. 30-39. Natal, Brasil.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A. (2013). *Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry*. Journal of Cleaner Production, 51. pp. 142-161. Editora Elsevier.
- Bignozzi, M., Sandrolini, F. (2006). *Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete*. Cement and concrete research, N.º 36(4). pp. 735-739.
- Bravo, M., de Brito, J. (2012). *Concrete made with used tyre aggregate: durability- related performance*. Journal Cleaner Production N.º 25. Editora Elsevier. pp. 42-50.
- Cairns, R., Kew, H., Kenny, M. (2004). *The use of recycled rubber tyres in concrete construction. Final Report*. University of Strathclyde. Glasgow.
- Carvalho, R. (2019). *Dissertação de mestrado “Argamassas produzidas através da activação alcalina de cinzas de fundo provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos: Optimização do activador alcalino*. Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Carvalho, R., Silva, R., de Brito, J., Pereira, M. (2021). *Alkali activation of bottom ash from municipal solid waste incineration: Optimization of NaOH and Na₂SiO₃ based activators*. Journal of Cleaner Production, 291. Editora Elsevier. pp. 1-11.
- Correia, S., Partala, T., Loch, F., Segadães, A. (2010). *“Factorial design used to model the compressive strength of mortars containing recycled rubber”*. Composite Structures 92(9). pp. 2047-2051.
- Coutinho, J. (2006). *Materiais de Construção 2 – 1.ª Parte – Ligantes e caldas, 2002. Atualização 2006*. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Portugal.
- Duarte, A., Silva, B., Silvestre, N., de Brito, J., Júlio, E., Castro, J. (2016). *Tests and design of short steel tubes filled with rubberised concrete*. Engineering Structures N.º 112. pp. 274-286.

- Duarte, A., Silvestre, N., de Brito, J., Júlio, E. (2017). *Numerical study of the compressive mechanical behaviour of rubberized concrete using the eXtended Finite Element Method (XFEM)*. Composite Structures, 179. pp. 132-145.
- Elchalakani, M. (2015). *High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers*. Structures. Vol. 1. pp.20-38.
- Fernández-Jimenez, A. (2000). *Cementos de escorias ativadas alcalinamente: influencia de las variables y modernización del proceso*. (Tese de Doutoramento em Engenharia Civil), Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Espanha.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Criado, M. (2005). *Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model*. Cement and Concrete Research, 35(6), pp. 1204-1209.
- Glukhovskiy, V., Rostovskaja, G., Rumyna, G. (1980). *High strength slag alkaline cements*. 7th International Congress on the Chemistry of Cement. N.º 3, pp.164-168.
- Gomes, A., Pinto, A., Pinto, J.(2013). *Cimento Portland e adições*. Materiais de Construção. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa. Lisboa. Portugal.
- Guo, S., Dai, Q., Si, R., Sun, X., Lu, C. (2017). *Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire*. Journal of Cleaner Production N.º 148. pp. 681-689.
- Khaloo, A., Dehestani, M., & Rahmatabadi, P. (2008). *Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles*. Waste management, N.º28(12). pp. 2472-2482.
- Khatib, Z., Bayomy, F. (1999). *“Rubberized portland cement concrete.”* J. Mater. Civ. Eng., 11(3), pp. 206–213.
- Krivenko, P. (2017). *Why alkaline activation - 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials*. Journal of Ceramic Science and Technology, Vol. 8, N.º3, pp. 323-334.
- Li, Z., Li, F. e Li, J.S.L. (1999). *Properties of concrete incorporating rubber tyre particles*. Magazine of concrete research, 50, n.º4. pp. 297-304.
- Martins, A.(2008). *Dissertação “Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco”*. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Marvila, M., Azevedo, A., Vieira, C. (2020). *Mecanismos de reação de materiais álcali ativados*. Revista IBRACON de estruturas e materiais, Vol. 14, N.º 3. pp. 1.-26. Brasil.
- Meneguini, E. (2011). *Tese de Doutoramento intitulada “Avaliação de concreto asfáltico com incorporação de pó de borracha reciclada de pneus, tratada superficialmente com hidróxido de sódio comercial*. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Brasil.
- Mohammadi, I., Khabbaz, H., Vessalas, K. (2016). *Melhoria do desempenho mecânico de pavimentos de betão com borracha tratada com hidróxido de sódio*. Materials and Structures n.º 49. pp. 813–827.
- Najim, K., Hall, M. (2010). *A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC)*. Construction and building materials, Vol. 24. pp. 2043-2051.

- Nepomuceno, M. (1999). *Aula teórico-prática subordinada ao “Estudo sobre composição de betões”*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade da Beira Interior. Covilhã. Portugal.
- Neto, J. (2021). *Dissertação de Mestrado sobre “Influência da concentração alcalina (NaOH) e razão dos reagentes alcalinos ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) em concreto álcali-ativado de base metacaolim”*. Universidade Federal de Paraíba. Brasil.
- Neves, R. (2022). *Dissertação de Mestrado sobre “Desempenho de betões produzidos com ligantes obtidos através da ativação alcalina de diferentes RCD”*. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Palomo, A., Alonso, S., Fernandez-Jiménez, A., Sobrados, I., Sanz, J. (2004). *Alkaline activation of fly ashes. A NMR study of the reaction products*. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 87, N.º 6. pp. 1141-1145.
- Palomo, A., Fernández-Jimenez, A., Kovalchuck, G. (2005) - “Some key factors affecting the alkali activation of fly ash”. 2nd International Symposium of Non-Traditional Cement and Concrete, Brno, República Checa.
- Panizza, M., Natali, M., Garbin, E., Tamburini, S., Secco, M. (2018). *Assessment of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates as a building material*. Construction and building materials, Vol. 181. pp.119-133.
- Pedro, D. (2011). *Dissertação de Mestrado intitulada “Desempenho de argamassas fabricadas com incorporação de materiais finos provenientes da trituração de pneus”*. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Pedro, D., De Brito, J., Veiga, R. (2013). *Mortars made with fine granulate from shredded tires*. Journal of materials in civil engineering, Vol. 25, n.º 4. pp. 519-529.
- Provis, J. e Deventer, J. (2014). *Alkali Activated Materials*. RILEM State-of-the-Arts Reports Vol. 13. Springer. Londres.
- Santos, C., Rodrigues, J. (2015). *Concreto com agregados reciclados de borracha de pneu. Resistência à compressão a altas temperaturas*. ResearchGate. pp. 1-14.
- Segre, N., Joekes, I. (2000). *Use of tire rubber particles as addition to cement paste*. Cement and concrete research, Vol. 30, N.º 9. pp. 1421-1425.
- Silva, P. (2007). *Dissertação de Mestrado “Métodos de estudo da composição de betão auto-compactável (BAC) - Verificação da sua aplicabilidade técnico-económica*. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Silva, P. (2017). *Dissertação de Mestrado intitulada “Estudo de Argamassas com incorporação de resíduos de casca de ovo”*. Universidade de Coimbra. Coimbra.
- Silva, R., Suescum-Morales, D., Bravo, M., Jimenez, J., Fernandez-Rodríguez, J., de Brito, J. (2022). *Effect of incorporating municipal solid waste incinerated bottom ash in alkali-activated fly ash concrete subjected to accelerated CO_2 curing*. Journal of cleaner production, Vol. 370. pp. 1-17.
- Souza, A.(2019). *Análise das propriedades da argamassa produzida com adição do resíduo da borracha de pneu triturado*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá. Brasil.
- Suescum-Morales, D., Bravo, M., Silva, R., Jiménez, J., Fernandez-Rodríguez, M., de Brito, J. (2022). *Effect of reactive magnesium oxide in alkali-activated fly ash mortars exposed to accelerated CO_2 curing*. Construction and building materials, Vol. n.º 342, Part B. pp. 1-23.

- Thomas, B.S., Gupta, R.C. (2016). *A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54. pp. 1323-1333.
- Torgal, F., Jalali, S. (2009). *Ligantes obtidos por ativação alcalina*. Universidade do Minho. Guimarães.
- Turatsinze, A., Bonnet, S., Granju, J. (2007). *Potencial of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: Improvement in cracking shrinkage resistance*. Construction and Building Materials, N.º 21 (1). Elsevier. pp. 176-181.
- Turatsinze, A., Garros, M. (2008). *On the modulus of elasticity and strain capacity of self-compacting concrete incorporating rubber aggregates*. Resources, Conservation and Recycling 52(10).pp. 1209-1215.
- Uygunoğlu, T., and Topçu, I. B. (2010). “*The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars.*” Constr. Build. Mater., 24(7), 1141–1150.
- Valadares, F., Bravo, M., de Brito, J. (2012). *Concretes with rubber aggregates from used tires – Mechanical performance*. ACI Materials Journal, Vol. 109. pp. 283-292.
- Youssf, O., Mills, J., Hassanli, R. (2016). *Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete*. Constrution and Building Materials, Vol. 125. Elsevier. pp.175-183.

NORMAS/ESPECIFICAÇÕES DE ENSAIOS:

- ASTM C618 (2019) - *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM Internacional. United States.
- ASTM E1876 (2022) - *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. ASTM Internacional.
- Diretiva N.º 98/83/CE do Conselho, de 3 de Novembro de 1998, relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano, publicada no Jornal Oficial N.º L 330 de 5-12-98. pp. 32-54.
- Diretiva N.º 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterros, publicada no Jornal Oficial N.º L 182 de 16-07-1999. pp. 1-19.
- EN 1015-2:1998 – *Methods of test for mortar for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. European Committee for Sandardization. Brussels. Belgium.
- EN 1015-3:1999 - *Methods of test mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- EN 1015-6:1999 - *Methods of test mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.Belgium.
- EN 1015-11:2019 - *Methods of test mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.Belgium.
- EN 1015-18:2002 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. European Committee for Standardization (CEN). Brussels. Belgium.
- EN 1097-6: 2013 - *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption*. European Committee for Standardization (CEN). Brussels. Belgium.

EN 12504-4:2021 - *Testing concrete in structures- Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

LNEC E 394-1993 - *Betão – Determinação da absorção de água por imersão*. Especificação LNEC, MOPTC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

NP EN 197-1:2012 - *Cimento: parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Instituto Português da Qualidade. Caparica. Portugal.

NP EN 933-1:2012 - *“Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: análise granulométrica. Método de peneiração”*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 998-1:2013 – *Especificações de argamassas para alvenaria: Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Instituto Português da Qualidade. Caparica. Portugal.

NP EN 1097-3:2002 - *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3- Determinação da bariidade e do volume de vazios..* IPQ – Instituto Português da Qualidade. Caparica. Portugal.

RILEM I.1 (1980) - *Porosity accessible to water, RILEM 25-PEM - Recommendations provisoires. Essais recommandés pour mesurer l’altération des pierres et évaluer l’efficacité des méthodes de traitement*. Matériaux et Construction, Vol.13, N°75.

SITES DE INTERNET:

(Autoaftermarketnews, 2024). <http://www.autoaftermarketnews.com/pt/noticias/vida/ambiente/a-europa-trata-94-dos-pneus-em-fim-de-vida/> (acedido em 09-04-2024).

(Brasilecola, 2024). <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/borracha-natural-sintetica.htm> (acedido em 26-05-2024).

(Ctborracha, 2024). <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/pneus/o-fabrico-de-pneus/componentes/> (acedido em 26-05-2024).

(ECO2M, 2024). <https://eco2m.pt/projects/cinzas-volantes/> (acedido em 08-04-2024).

(Ordemengenheiros, 2024). Código de Ética e Deontologia. https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/regulamentos/codigo_ed.pdf (acedido em 06-05-2024).

APÊNDICES

- Apêndice A – Resumo dos resultados dos ensaios
- Apêndice B – Resultados da caracterização mecânica das argamassas
- Apêndice C – Resultados da caracterização física das argamassas



RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Tabela AP 1 - Resumo dos resultados dos ensaios às argamassas de cimento.

Resultados dos ensaios das argamassas na campanha experimental							
ID da Argamassa	ARC	A5C	A5C-T	A10C	A10C-T	A20C	A20C-T
Consistência por espalhamento [mm]	146	146	161,5	155	162,3	133	160,1
Massa volúmica [kg/m ³]							
0 dias (Estado fresco)	2188	2030,6	1989,8	1952,6	1885	1817,3	1771,2
28 dias	2048	1909,3	1873,4	1843,3	1803,4	1718,6	1681,4
56 dias	2053,5	1909,4	1866,8	1856,9	1796,5	1728,8	1681,1
Porosidade aberta [%]							
28 dias	19,3	25,3	25	26,9	26,5	29,4	28,4
56 dias	20,7	25	26,1	26,1	28	28,6	29,8
AAI - Absorção de água por imersão [%]							
28 dias	8,19	8,393	8,211	8,748	8,315	9,669	8,368
56 dias	8,084	8,181	8,125	8,465	8,666	9,198	8,758
Absorção de água por capilaridade							
Coefficiente Absorção [kg/(m ² .s ^{0.5})]							
28 dias	0,043	0,028	0,055	0,02	0,061	0,019	0,047
56 dias	0,059	0,025	0,023	0,018	0,033	0,018	0,024
Valor assintótico [kg/m ²]							
28 dias	14,46	12,81	11,71	12,13	12,04	11,38	9,27
56 dias	13,65	12,73	11,67	11,23	13,06	11,21	11,31
Velocidade de ultrassons [km/s]							
28 dias	2,299	2,171	2,143	2,07	2,015	1,978	1,904
56 dias	2,299	2,101	2,135	2,03	2,041	1,868	1,882
Resistência à compressão [MPa]							
28 dias	28,406	20,237	21,728	16,868	16,142	11,573	11,129
56 dias	30,546	20,471	20,621	16,807	14,353	12,059	10,440
Resistência à tração por flexão [MPa]							
28 dias	6,524	5,116	5,488	5,006	4,852	3,741	3,53
56 dias	6,366	5,068	4,915	4,412	3,886	3,835	3,096
Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]							
28 dias	24,68	20,58	20,7	16,62	17,3	12,3	12,75
56 dias	25,63	20,02	18,88	16,7	16,01	11,93	11,33

Tabela AP 2 - Resumo dos resultados dos ensaios às argamassas de cinzas volantes.

Resultados dos ensaios das argamassas na campanha experimental							
ID da Argamassa	ARAA	A5AA	A5AA-T	A10AA	A10AA-T	A20AA	A20AA-T
Consistência por espalhamento [mm]	155	145,5	146	133	142,5	120	125
Massa volúmica [kg/m ³]							
0 dias (Estado fresco)	2219,7	2217	2197,7	2172,7	2172	2080,3	2092,2
28 dias	2101,8	2043	2032,1	1971,6	1974,9	1899,1	1869,7
56 dias	2098,9	2039,4	2033,4	2000,7	1981,1	1904,5	1885,5
Porosidade aberta [%]							
28 dias	17,3	18,9	18,3	20,3	19,3	20,5	20,8
56 dias	18,1	18,9	18,6	19,1	20,2	20,1	21,1
AAI - Absorção de água por imersão [%]							
28 dias	5,456	5,444	5,876	5,621	6,238	5,645	6,674
56 dias	5,604	5,645	5,897	5,941	6,426	6,22	6,942
Absorção de água por capilaridade							
Coefficiente Absorção [kg/(m ² .s ^{0.5})]							
28 dias	0,038	0,026	0,03	0,019	0,027	0,017	0,02
56 dias	0,066	0,049	0,057	0,042	0,058	0,027	0,063
Valor assintótico [kg/m ²]							
28 dias	9,69	10,52	10,58	10,54	10,58	10,79	10,67
56 dias	10,21	10,85	10,83	10,46	10,71	10,75	11,06
Velocidade de ultrassons [km/s]							
28 dias	2,238	2,155	2,181	2,11	2,098	1,988	1,949
56 dias	2,301	2,233	2,242	2,171	2,161	2,062	2,019
Resistência à compressão [MPa]							
28 dias	46,140	38,775	40,578	32,112	27,289	24,629	24,233
56 dias	53,010	44,231	47,068	35,153	28,386	29,571	26,260
Resistência à tração por flexão [MPa]							
28 dias	10,403	8,817	8,832	8,17	8,183	6,974	6,426
56 dias	11,447	11,096	11,014	8,137	8,838	8,407	7,177
Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]							
28 dias	25,60	22,19	21,84	18,77	20,03	15,62	15,73
56 dias	30,33	28,14	24,64	20,74	20,6	18,52	17,05

Tabela AP 3 - Resultados dos ensaios de absorção de água e massa volúmica dos agregados.

Resultados dos ensaios de absorção de água e massa volúmica dos agregados								
Material	M1 [g]	M2 [g]	M3 [g]	M4 [g]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_{rd} [kg/m ³]	ρ_{ssd} [kg/m ³]	WA[%]
Areia Fina	100,30	202,34	140,80	100,00	2594,90	2574,82	2582,54	0,30
Areia Grossa	100,67	202,06	140,29	100,00	2610,52	2565,55	2582,74	0,67
Borracha	36,30	141,74	140,80	35,00	1025,54	987,84	1024,53	3,71

Onde:

M1 = Massa da amostra saturada com a superfície seca;

M2 = Massa do picnómetro com água e amostra após 24 horas;

M3 = Massa do picnómetro cheio de água;

M4 = Massa da amostra seca em estufa;

Tabela AP 4 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento das argamassas.

Espalhamento das argamassas [mm]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC	146,0	146,0	155,0	133,0
AC-T	146,0	161,5	162,3	160,1
AAA	155,0	145,5	133,0	120,0
AAA-T	155,0	146,0	142,5	125,0

Tabela AP 5 - Resultados do ensaio da massa volúmica das argamassas no estado fresco.

Massa volúmica das argamassas [kg/m ³]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC	2188,0	2030,6	1952,6	1817,3
AAA	2219,7	2217,0	2172,7	2080,3
AC-T	2188,0	1989,8	1885,0	1771,2
AAA - T	2219,7	2197,7	2172,0	2092,2

Tabela AP 6 - Resultados do ensaio da resistência à tração por flexão nas argamassas.

Resistência à tração por flexão [MPa]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC (28 dias)	6,524	5,116	5,006	3,741
AAA (28 dias)	10,403	8,817	8,170	6,974
AC-T (28 dias)	6,524	5,488	4,852	3,530
AAA-T (28 dias)	10,403	8,832	8,183	6,426
AC (56 dias)	6,366	5,068	4,412	3,835
AAA (56 dias)	11,447	11,096	8,137	8,407
AC-T (56 dias)	6,366	4,915	3,886	3,096
AAA-T (56 dias)	11,447	11,014	8,838	7,177

Tabela AP 7 - Resultados do ensaio da resistência à compressão nas argamassas.

Resistência à compressão [MPa]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC (28 dias)	28,406	20,237	16,868	11,573
AAA (28 dias)	46,140	38,775	32,112	24,629
AC-T (28 dias)	28,406	21,728	16,142	11,129
AAA-T (28 dias)	46,140	40,578	27,289	24,233
AC (56 dias)	30,546	20,471	16,807	12,059
AAA (56 dias)	53,010	44,231	35,153	29,571
AC-T (56 dias)	30,546	20,621	14,353	10,440
AAA-T (56 dias)	53,010	47,068	28,368	26,260

Tabela AP 8 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico nas argamassas.

Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC (28 dias)	24,68	20,58	16,62	12,30
AAA (28 dias)	25,60	22,19	18,77	15,62
AC-T (28 dias)	24,68	20,70	17,30	12,75
AAA-T (28 dias)	25,60	21,84	20,03	15,73
AC (56 dias)	25,63	20,02	16,70	11,93
AAA (56 dias)	30,33	28,14	20,74	18,52
AC-T (56 dias)	25,63	18,88	16,01	11,33
AAA-T (56 dias)	30,33	24,64	20,60	17,05

Tabela AP 9 - Resultados do ensaio da porosidade aberta nas argamassas.

Porosidade aberta [%]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC (28 dias)	19,3	25,3	26,9	29,4
AAA (28 dias)	17,3	18,9	20,3	20,5
AC-T (28 dias)	19,3	25,0	26,5	28,4
AAA-T (28 dias)	17,3	18,3	19,3	20,8
AC (56 dias)	20,7	25,0	26,1	28,6
AAA (56 dias)	18,1	18,9	19,1	20,1
AC-T (56 dias)	20,7	26,1	28,0	29,8
AAA-T (56 dias)	18,1	18,6	20,2	21,1

Tabela AP 10 - Resultados do ensaio de massa volúmica no estado endurecido.

Massa volúmica no estado endurecido [kg/m ³]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC (28 dias)	2048,0	1909,3	1843,3	1718,6
AAA (28 dias)	2101,8	2043,0	1971,6	1899,1
AC-T (28 dias)	2048,0	1873,4	1803,4	1681,4
AAA-T (28 dias)	2101,8	2032,1	1974,9	1869,7
AC (56 dias)	2053,5	1909,4	1856,9	1728,8
AAA (56 dias)	2098,9	2039,4	2000,7	1904,5
AC-T (56 dias)	2053,5	1866,8	1796,5	1681,1
AAA-T (56 dias)	2098,9	2033,4	1981,1	1885,5

Tabela AP 11 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão.

Absorção de água por imersão [%]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC (28 dias)	8,190	8,393	8,748	9,669
AAA (28 dias)	5,456	5,444	5,621	5,645
AC-T (28 dias)	8,190	8,211	8,315	8,368
AAA-T (28 dias)	5,456	5,876	6,238	6,674
AC (56 dias)	8,084	8,181	8,465	9,198
AAA (56 dias)	5,604	5,645	5,941	6,220
AC-T (56 dias)	8,084	8,125	8,666	8,758
AAA-T (56 dias)	5,604	5,897	6,426	6,942

Tabela AP 12 - Resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/(m ² .s ^{0.5})]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC (28 dias)	0,043	0,028	0,02	0,019
AAA (28 dias)	0,038	0,026	0,019	0,017
AC-T (28 dias)	0,043	0,055	0,061	0,047
AAA-T (28 dias)	0,038	0,03	0,027	0,02
AC (56 dias)	0,059	0,025	0,018	0,018
AAA (56 dias)	0,066	0,049	0,042	0,027
AC-T (56 dias)	0,059	0,023	0,033	0,024
AAA-T (56 dias)	0,066	0,057	0,058	0,063

Tabela AP 13 - Resultados do valor assintótico de absorção de água por capilaridade.

Valor assintótico de AAC [kg/m ²]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC (28 dias)	14,46	12,81	12,13	11,38
AAA (28 dias)	9,69	10,52	10,54	10,79
AC-T (28 dias)	14,46	11,71	12,04	9,27
AAA-T (28 dias)	9,69	10,58	10,58	10,67
AC (56 dias)	13,65	12,73	11,23	11,21
AAA (56 dias)	10,21	10,85	10,46	10,75
AC-T (56 dias)	13,65	11,67	13,06	11,31
AAA-T (56 dias)	10,21	10,83	10,71	11,06

Tabela AP 14 - Resultados do ensaio VPU.

Velocidade de propagação do ultrassom das argamassas [km/s]				
% Borracha	0%	5%	10%	20%
AC (28 dias)	2,299	2,171	2,070	1,978
AAA (28 dias)	2,238	2,155	2,110	1,988
AC-T (28 dias)	2,299	2,143	2,015	1,904
AAA-T (28 dias)	2,238	2,181	2,098	1,949
AC (56 dias)	2,299	2,101	2,030	1,868
AAA (56 dias)	2,301	2,233	2,171	2,062
AC-T (56 dias)	2,299	2,135	2,041	1,882
AAA-T (56 dias)	2,301	2,242	2,161	2,019

B

RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ARGAMASSAS

B.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela AP 15 - Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas a 28 e 56 dias.

Resultados do Ensaio da Resistência à Compressão											
ID Argamassa	Idade [dias]	Provete 1		Provete 2		Provete 3		Média		Desvio Padrão	
		Força [kN]	Tensão[MPa]	Força [kN]	Tensão[MPa]	Força [kN]	Tensão[MPa]	Força [kN]	Tensão[MPa]	Força [kN]	Tensão[MPa]
ARC	28	45,732	28,583	46,045	28,778	44,570	27,856	45,449	28,406	0,777	0,486
A5C	28	33,780	21,113	30,999	19,374	32,358	20,224	32,379	20,237	1,391	0,869
A10C	28	26,957	16,848	27,636	17,273	26,375	16,484	26,989	16,868	0,631	0,394
A20C	28	18,465	11,541	18,816	11,760	18,270	11,419	18,517	11,573	0,277	0,173
ARAA	28	70,295	43,934	72,864	45,540	78,313	48,946	73,824	46,140	4,094	2,559
A5AA	28	62,669	39,168	57,504	35,940	65,948	41,218	62,040	38,775	4,257	2,661
A10AA	28	53,834	33,646	52,602	32,876	47,701	29,813	51,379	32,112	3,244	2,028
A20AA	28	41,034	25,646	38,033	23,771	39,151	24,469	39,406	24,629	1,517	0,948
A5C-T	28	33,775	21,109	35,670	22,294	34,847	21,779	34,764	21,728	0,950	0,594
A10C-T	28	22,737	14,211	27,537	17,211	27,206	17,004	25,827	16,142	2,681	1,676
A20C-T	28	17,837	11,148	17,600	11,000	17,983	11,239	17,807	11,129	0,193	0,121
A5AA-T	28	58,031	36,269	69,285	43,303	67,458	42,161	64,925	40,578	6,040	3,775
A10AA-T	28	47,131	29,457	44,882	28,051	38,975	24,359	43,663	27,289	4,213	2,633
A20AA-T	28	41,107	25,692	41,112	25,695	34,101	21,313	38,773	24,233	4,046	2,529
ARC	56	48,683	30,427	48,697	30,436	49,242	30,776	48,874	30,546	0,319	0,199
A5C	56	33,864	21,165	32,808	20,505	31,588	19,743	32,753	20,471	1,139	0,712
A10C	56	26,486	16,554	27,702	17,314	26,486	16,554	26,891	16,807	0,702	0,439
A20C	56	17,363	10,852	18,661	11,663	21,858	13,661	19,294	12,059	2,313	1,446
ARAA	56	88,071	55,044	86,472	54,045	79,905	49,941	84,816	53,010	4,328	2,705
A5AA	56	72,478	45,299	66,521	41,576	73,310	45,819	70,770	44,231	3,703	2,314
A10AA	56	57,322	35,826	53,675	33,547	57,736	36,085	56,244	35,153	2,236	1,397
A20AA	56	45,799	28,624	47,444	29,653	48,696	30,435	47,313	29,571	1,453	0,908
A5C-T	56	34,491	21,557	31,616	19,760	32,872	20,545	32,993	20,621	1,441	0,901
A10C-T	56	16,735	10,459	26,701	16,688	25,460	15,913	22,965	14,353	5,431	3,394
A20C-T	56	18,452	11,533	16,239	10,149	15,419	9,637	16,703	10,440	1,569	0,981
A5AA-T	56	77,608	48,505	72,987	45,617	75,329	47,081	75,308	47,068	2,311	1,444
A10AA-T	56	35,582	22,239	44,815	28,009	55,858	34,911	45,418	28,386	10,151	6,345
A20AA-T	56	35,206	22,004	42,410	26,506	48,433	30,271	42,016	26,260	6,622	4,139

B.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

Tabela AP 16 - Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão das argamassas a 28 e 56 dias.

Resultados do Ensaio da Resistência à Tração por Flexão											
ID Argamassa	Idade [dias]	Provete 1		Provete 2		Provete 3		Média		Desvio Padrão	
		Força [KN]	Tensão[MPa]	Força [KN]	Tensão[MPa]	Força [KN]	Tensão[MPa]	Força [KN]	Tensão[MPa]	Força [KN]	Tensão[MPa]
ARC	28	2,719	6,373	2,85	6,680	2,782	6,520	2,784	6,524	0,066	0,154
A5C	28	2,082	4,880	2,124	4,978	2,343	5,491	2,183	5,116	0,140	0,328
A10C	28	1,985	4,652	2,165	5,074	2,258	5,292	2,136	5,006	0,139	0,325
A20C	28	1,527	3,579	1,603	3,757	1,659	3,888	1,596	3,741	0,066	0,155
ARAA	28	4,467	10,470	4,55	10,659	4,301	10,080	4,439	10,403	0,126	0,295
A5AA	28	3,806	8,920	3,782	8,864	3,698	8,667	3,762	8,817	0,057	0,133
A10AA	28	3,453	8,093	3,657	8,571	3,348	7,847	3,486	8,170	0,157	0,368
A20AA	28	3,041	7,127	2,948	6,909	2,938	6,886	2,976	6,974	0,057	0,133
A5C-T	28	2,335	5,473	2,293	5,374	2,397	5,618	2,342	5,488	0,052	0,123
A10C-T	28	1,749	5,374	1,970	4,617	1,947	4,563	2,070	4,852	0,122	0,453
A20C-T	28	1,559	3,654	1,421	3,330	1,539	3,607	1,786	3,530	0,075	0,175
A5AA-T	28	3,732	8,747	3,813	8,937	3,76	8,813	3,768	8,832	0,041	0,096
A10AA-T	28	3,853	9,030	3,39	7,943	3,232	7,575	3,491	8,183	0,323	0,757
A20AA-T	28	2,744	6,431	2,974	6,970	2,507	5,876	2,742	6,426	0,234	0,547
ARC	56	2,675	6,270	2,638	6,183	2,836	6,647	2,716	6,366	0,105	0,247
A5C	56	2,159	5,060	2,215	5,191	2,113	4,952	2,162	5,068	0,051	0,120
A10C	56	1,872	4,388	1,87	4,388	1,903	4,460	1,882	4,412	0,018	0,042
A20C	56	1,437	3,368	1,605	3,762	1,867	4,376	1,636	3,835	0,217	0,508
ARAA	56	4,778	11,198	5,048	11,831	4,826	11,311	4,884	11,447	0,144	0,338
A5AA	56	4,457	10,446	4,814	11,283	4,932	11,559	4,734	11,096	0,247	0,580
A10AA	56	3,352	7,856	3,531	8,276	3,532	8,278	3,472	8,137	0,104	0,243
A20AA	56	3,530	8,273	3,625	8,496	3,606	8,452	3,587	8,407	0,050	0,118
A5C-T	56	2,117	4,962	1,934	4,533	2,240	5,250	2,097	4,915	0,154	0,361
A10C-T	56	1,609	3,771	1,727	4,048	1,638	3,839	1,658	3,886	0,061	0,144
A20C-T	56	1,420	3,328	1,262	2,958	1,281	3,002	1,321	3,096	0,086	0,202
A5AA-T	56	4,878	11,433	4,696	11,006	4,524	10,603	4,699	11,014	0,177	0,415
A10AA-T	56	3,185	7,465	3,888	9,113	4,239	9,935	3,771	8,838	0,537	1,258
A20AA-T	56	2,932	6,872	2,971	6,963	3,284	7,697	3,062	7,177	0,193	0,452

B.3 RESULTADOS DO ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Tabela AP 17 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico de cada provete a 28 dias.

ID	Proвете	m (g)	ff (Hz)	b (mm)	L(mm)	t(mm)	μ	T1	MED(Gpa)
ARC 28 dias	ARC - 1	545,4	4610,0	40	160	40	0,2	1,40	24,61
	ARC - 2	545,30	4623,7	40	160	40	0,2	1,40	24,75
A5C 28 dias	A5C - 1	510,02	4405,7	40	160	40	0,21	1,40	21,04
	A5C - 2	506,76	4321,7	40	160	40	0,21	1,40	20,12
A10C 28 dias	A10C - 1	500,66	3975,0	40	160	40	0,22	1,40	16,83
	A10C - 2	490,78	3964,7	40	160	40	0,22	1,40	16,41
A20C 28 dias	A20C - 1	456,42	3446,7	40	160	40	0,24	1,41	11,56
	A20C - 2	474,08	3591,3	40	160	40	0,24	1,41	13,03
ARAA 28 dias	ARAA-1	574,3	4605,3	40	160	40	0,20	1,40	25,86
	ARAA-6	565,30	4595,3	40	160	40	0,20	1,40	25,35
A5AA 28 dias	A5AA-2	570,7	4264,3	40	160	40	0,21	1,40	22,06
	A5AA-6	574,10	4277,3	40	160	40	0,21	1,40	22,32
A10AA 28 dias	A10AA-3	541,3	4113,7	40	160	40	0,22	1,40	19,49
	A10AA-6	515,30	4058,3	40	160	40	0,22	1,40	18,05
A20AA 28 dias	A20AA-2	525,2	3785,0	40	160	40	0,23	1,41	16,04
	A20AA-5	510,60	3737,0	40	160	40	0,23	1,41	15,20
A5C-T 28 dias	A5C-T-1	525,18	4364,0	40	160	40	0,21	1,40	21,26
	A5C-T-5	505,63	4327,7	40	160	40	0,21	1,40	20,13
A10C-T 28 dias	A10C-T-3	493,26	4092,3	40	160	40	0,22	1,40	17,57
	A10C-T-6	495,06	4021,0	40	160	40	0,22	1,40	17,03
A20C-T 28 dias	A20C-T-2	463,6	3527,0	40	160	40	0,24	1,41	12,29
	A20C-T-4	472,97	3618,0	40	160	40	0,24	1,41	13,20
A5AA-T 28 dias	A5AA-T-1	558,92	4314,3	40	160	40	0,21	1,40	22,11
	A5AA-T-5	563,93	4242,0	40	160	40	0,21	1,40	21,57
A10AA-T 28 dias	A10AA-T-2	550,36	4136,7	40	160	40	0,22	1,40	20,03
	A10AA-T-2	550,36	4136,7	40	160	40	0,22	1,40	20,03
A20AA-T 28 dias	A20AA-T-3	513,73	3738,0	40	160	40	0,23	1,41	15,30
	A20AA-T-6	513,840	3841,0	40	160	40	0,23	1,41	16,16

Tabela AP 18 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico de cada provete a 56 dias.

ID	Proвете	m (g)	ff (Hz)	b (mm)	L(mm)	t(mm)	μ	T1	MED(Gpa)
ARC 56 dias	ARC-5	543,32	4677,7	40	160	40	0,20	1,40	25,24
	ARC-7	538,750	4769,7	40	160	40	0,20	1,40	26,02
A5C 56 dias	A5C-4	508,33	4353,0	40	160	40	0,21	1,40	20,47
	A5C-6	507,96	4258,0	40	160	40	0,21	1,40	19,57
A10C 56 dias	A10C-1	499,24	3972,3	40	160	40	0,22	1,40	16,76
	A10C-7	498,80	3959,0	40	160	40	0,22	1,40	16,63
A20C 56 dias	A20C-2	455,39	3427,0	40	160	40	0,24	1,41	11,40
	A20C-5	458,92	3566,7	40	160	40	0,24	1,41	12,45
ARAA 56 dias	ARAA-4	568,61	5032,0	40	160	40	0,20	1,40	30,57
	ARAA-6	560,60	5026,7	40	160	40	0,20	1,40	30,08
A5AA 56 dias	A5AA-5	556,09	4824,7	40	160	40	0,21	1,40	27,51
	A5AA-6	569,75	4874,3	40	160	40	0,21	1,40	28,77
A10AA 56 dias	A10AA-4	510,67	4442,7	40	160	40	0,22	1,40	21,44
	A10AA-6	507,19	4309,0	40	160	40	0,22	1,40	20,03
A20AA 56 dias	A20AA-6	517,8	4006,7	40	160	40	0,23	1,41	17,72
	A20AA-4	520,05	4173,7	40	160	40	0,23	1,41	19,31
A5C-T 56 dias	A5C-T-5	502,48	4231,0	40	160	40	0,21	1,40	19,12
	A5C-T-6	503,48	4172,3	40	160	40	0,21	1,40	18,63
A10C-T 56 dias	A10C-T-4	490,32	3920,3	40	160	40	0,22	1,40	16,03
	A10C-T-6	490,71	3912,3	40	160	40	0,22	1,40	15,98
A20C-T 56 dias	A20C-T-5	461,49	3400,3	40	160	40	0,24	1,41	11,37
	A20C-T-6	455,18	3409,3	40	160	40	0,24	1,41	11,28
A5AA-T 56 dias	A5AA-T4	551,84	4591,3	40	160	40	0,21	1,40	24,72
	A5AA-T5	558,520	4548,7	40	160	40	0,21	1,40	24,56
A10AA-T 56 dias	A10AA-T-5	484,95	4469,0	40	160	40	0,22	1,40	20,60
	A10AA-T-5	484,95	4469,0	40	160	40	0,22	1,40	20,60
A20AA-T 56 dias	A20AA-T-4	471,76	4147,0	40	160	40	0,23	1,41	17,29
	A20AA-T-5	492,040	4003,3	40	160	40	0,23	1,41	16,81

Tabela AP 19 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas a 28 dias.

Resultados do Ensaio do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MED)										
ID Argamassa	Idade [dias]	Leitura	Provete 1			Provete 2			Média MED [GPa]	D. P. MED [GPa]
			Frequência [KHz]	Massa (g)	MED [GPa]	Frequência [KHz]	Massa (g)	MED [GPa]		
ARC	28	1	4,596	545,4	24,61	4,625	545,30	24,75	24,68	0,10
		2	4,614			4,620				
		3	4,62			4,626				
A5C	28	1	4,402	510,02	21,04	4,315	506,76	20,12	20,58	0,65
		2	4,407			4,322				
		3	4,408			4,328				
A10C	28	1	3,969	500,66	16,83	3,967	490,78	16,41	16,62	0,30
		2	3,978			3,963				
		3	3,978			3,964				
A20C	28	1	3,446	456,42	11,56	3,590	474,08	13,03	12,30	1,04
		2	3,448			3,595				
		3	3,446			3,589				
ARAA	28	1	4,610	574,3	25,86	4,590	565,30	25,35	25,60	0,36
		2	4,593			4,597				
		3	4,613			4,599				
A5AA	28	1	4,265	570,7	22,06	4,276	574,10	22,32	22,19	0,19
		2	4,263			4,281				
		3	4,265			4,275				
A10AA	28	1	4,107	541,3	19,49	4,077	515,30	18,05	18,77	1,01
		2	4,097			4,044				
		3	4,137			4,054				
A20AA	28	1	3,781	525,2	16,04	3,740	510,60	15,20	15,62	0,59
		2	3,797			3,737				
		3	3,777			3,734				
A5C-T	28	1	4,363	525,18	21,26	4,339	505,63	20,13	20,70	0,80
		2	4,366			4,326				
		3	4,363			4,318				
A10C-T	28	1	4,087	493,26	17,57	4,022	495,06	17,03	17,30	0,38
		2	4,093			4,022				
		3	4,097			4,019				
A20C-T	28	1	3,530	463,6	12,29	3,607	472,97	13,20	12,75	0,64
		2	3,519			3,625				
		3	3,532			3,622				
A5AA-T	28	1	4,296	558,92	22,11	4,254	563,93	21,57	21,84	0,38
		2	4,322			4,222				
		3	4,325			4,250				
A10AA-T	28	1	4,141	550,36	20,03	4,141	550,36	20,03	20,03	0,00
		2	4,132			4,132				
		3	4,137			4,137				
A20AA-T	28	1	3,735	513,73	15,30	3,839	513,84	16,16	15,73	0,61
		2	3,741			3,844				
		3	3,738			3,840				

Tabela AP 20 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas a 56 dias.

Resultados do Ensaio do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MED)										
ID Argamassa	Idade [dias]	Leitura	Provete 1			Provete 2			Média MED [GPa]	D. P. MED [GPa]
			Frequência [KHz]	Massa (g)	MED [GPa]	Frequência [KHz]	Massa (g)	MED [GPa]		
ARC	56	1	4,690	543,32	25,24	4,763	538,75	26,02	25,63	0,55
		2	4,697			4,775				
		3	4,646			4,771				
A5C	56	1	4,371	508,33	20,47	4,254	507,96	19,57	20,02	0,64
		2	4,351			4,261				
		3	4,337			4,259				
A10C	56	1	3,979	499,24	16,76	3,964	498,80	16,63	16,70	0,09
		2	3,967			3,957				
		3	3,971			3,956				
A20C	56	1	3,426	455,39	11,40	3,556	458,92	12,45	11,93	0,74
		2	3,426			3,604				
		3	3,429			3,540				
ARAA	56	1	5,035	568,61	30,57	5,023	560,60	30,08	30,33	0,35
		2	5,029			5,032				
		3	5,032			5,025				
A5AA	56	1	4,822	556,09	27,51	4,880	569,75	28,77	28,14	0,89
		2	4,823			4,886				
		3	4,829			4,857				
A10AA	56	1	4,440	510,67	21,44	4,252	507,19	20,03	20,74	1,00
		2	4,447			4,350				
		3	4,441			4,325				
A20AA	56	1	4,007	517,8	17,72	4,180	520,05	19,31	18,52	1,12
		2	4,003			4,177				
		3	4,01			4,164				
A5C-T	56	1	4,258	502,48	19,12	4,179	503,48	18,63	18,88	0,35
		2	4,215			4,164				
		3	4,220			4,174				
A10C-T	56	1	3,922	490,32	16,03	3,915	490,71	15,98	16,01	0,04
		2	3,928			3,910				
		3	3,911			3,912				
A20C-T	56	1	3,405	461,49	11,37	3,406	455,180	11,28	11,33	0,06
		2	3,404			3,410				
		3	3,392			3,412				
A5AA-T	56	1	4,590	551,84	24,72	4,553	558,52	24,56	24,64	0,11
		2	4,597			4,554				
		3	4,587			4,539				
A10AA-T	56	1	4,457	484,95	20,60	4,457	484,95	20,60	20,60	0,00
		2	4,495			4,495				
		3	4,455			4,455				
A20AA-T	56	1	4,145	471,76	17,29	4,001	492,04	16,81	17,05	0,34
		2	4,147			4,005				
		3	4,149			4,004				



RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ARGAMASSAS

C.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Tabela AP 21 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão das argamassas.

Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Imersão (AAI)												
ID Argamassa	Idade [dias]	Provete 1			Provete 2			Provete 3			Média AAI [%]	D. P. AAI [%]
		M. Seca [g]	M. Saturada [g]	AAI [%]	M. Seca [g]	M. Saturada [g]	AAI [%]	M. Seca [g]	M. Saturada [g]	AAI [%]		
ARC	28	282,5	305,8	8,248	271,4	293,5	8,143	273,9	296,3	8,178	8,190	0,053
A5C	28	237,7	257,8	8,456	231,3	251,0	8,517	234	253,2	8,205	8,393	0,165
A10C	28	238,0	258,7	8,697	238,9	259,9	8,790	238,7	259,6	8,756	8,748	0,047
A20C	28	220,2	241,8	9,809	212,8	233,1	9,539	204	223,7	9,657	9,669	0,135
ARAA	28	247,6	261,2	5,493	259,7	274,0	5,506	275,6	290,4	5,370	5,456	0,075
A5AA	28	260,7	275,1	5,524	271,9	286,5	5,370	272,1	286,9	5,439	5,444	0,077
A10AA	28	243,9	257,8	5,699	251,8	265,9	5,600	255,2	269,4	5,564	5,621	0,070
A20AA	28	236,1	249,4	5,633	248,1	262,2	5,683	245,6	259,4	5,619	5,645	0,034
A5C - T	28	252,1	272,5	8,092	234,4	253,9	8,319	251,8	272,5	8,221	8,211	0,114
A10C - T	28	233,1	252,3	8,237	234,9	254,0	8,131	232	251,9	8,578	8,315	0,233
A20C - T	28	207,2	224,4	8,301	224,4	243,4	8,467	225,5	244,3	8,337	8,368	0,087
A5AA - T	28	265,3	281,2	5,993	266,6	282,2	5,851	252,5	267,1	5,782	5,876	0,108
A10AA - T	28	245,6	260,8	6,189	255,1	270,7	6,115	226,2	240,7	6,410	6,238	0,154
A20AA - T	28	231,1	246,2	6,534	246,7	263,3	6,729	233,8	249,6	6,758	6,674	0,122
ARC	56	239,0	258,3	8,075	268,5	290,7	8,268	268,1	289,3	7,907	8,084	0,180
A5C	56	243,9	263,5	8,036	243,3	263,4	8,261	237,7	257,3	8,246	8,181	0,126
A10C	56	225,9	245,0	8,455	239,7	260,1	8,511	223	241,8	8,430	8,465	0,041
A20C	56	217,4	237,9	9,430	224,6	245,3	9,216	230,2	250,8	8,949	9,198	0,241
ARAA	56	274,5	290,0	5,647	272,5	287,6	5,541	254,2	268,5	5,625	5,604	0,056
A5AA	56	261,8	276,6	5,653	266,1	281,1	5,637	267,5	282,6	5,645	5,645	0,008
A10AA	56	245,7	260,1	5,861	227,4	241,0	5,981	245,8	260,5	5,980	5,941	0,069
A20AA	56	236,4	251,1	6,218	244,8	259,9	6,168	234,3	249	6,274	6,220	0,053
A5C - T	56	243,0	262,8	8,148	236,6	255,5	7,988	242,8	262,8	8,237	8,125	0,126
A10C - T	56	237,8	258,1	8,537	244,6	265,9	8,708	231,9	252,2	8,754	8,666	0,115
A20C - T	56	222,7	241,9	8,621	224,4	244,3	8,868	225,4	245,2	8,784	8,758	0,125
A5AA - T	56	259,7	275,1	5,930	266,3	282,0	5,896	247,2	261,7	5,866	5,897	0,032
A10AA - T	56	219,8	234,1	6,506	219,4	233,7	6,518	254,2	270,1	6,255	6,426	0,148
A20AA - T	56	222,7	238,7	7,185	229,0	244,7	6,856	237,3	253,4	6,785	6,942	0,213

C.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE POROSIDADE ABERTA

Tabela AP 22 - Resultados do ensaio de porosidade aberta das argamassas a 28 dias.

Resultados do Ensaio de Porosidade Aberta											
ID Argamassa	Idade [dias]	Provete	M. Seca m [g]	M. Saturada m _{sat} [g]	M. Hidrós. m _{imerso} [g]	P.A. [%]	M.V. [Kg/m ³]	Média		Desvio Padrão	
								P.A. [%]	M.V. [kg/m ³]	P.A. [%]	M.V. [kg/m ³]
ARC	28	1	284,0	310,7	172,2	19,3	2046,4	19,3	2048,0	0,1	3,9
		2	272,9	298,3	165,6	19,1	2052,4				
		3	275,2	301,3	167	19,4	2045,0				
A5C	28	1	238,9	270,3	145,5	25,2	1910,4	25,3	1909,3	0,2	4,4
		2	232,7	263,2	141,8	25,1	1913,0				
		3	235,1	266,6	143,4	25,6	1904,5				
A10C	28	1	234,8	267,6	141,9	26,1	1864,2	26,9	1843,3	0,7	18,1
		2	240,1	275,6	144,9	27,2	1833,4				
		3	239,8	275,5	144,9	27,3	1832,5				
A20C	28	1	222,1	260,5	131,2	29,7	1714,3	29,4	1718,6	0,2	4,6
		2	214,5	251,1	126,5	29,4	1718,1				
		3	205,5	240,3	121,3	29,2	1723,4				
ARAA	28	1	248,6	269,2	150,8	17,4	2095,5	17,3	2101,8	0,2	5,5
		2	260,6	282,2	158,6	17,5	2104,2				
		3	276,6	299,1	168	17,2	2105,6				
A5AA	28	1	261,8	286,1	157,9	19,0	2038,0	18,9	2043,0	0,0	6,9
		2	272,9	298,2	164,7	19,0	2040,1				
		3	273,1	298,2	165,3	18,9	2050,8				
A10AA	28	1	244,8	270,5	146,1	20,7	1963,9	20,3	1971,6	0,4	8,9
		2	252,6	278,7	150,7	20,4	1969,5				
		3	256,1	281,8	152,8	19,9	1981,3				
A20AA	28	1	237,0	262,2	137,9	20,3	1902,9	20,5	1899,1	0,2	3,5
		2	249	276	145,1	20,6	1898,4				
		3	246,6	273,4	143,6	20,6	1896,0				
A5C-T	28	1	251,9	284,6	151,6	24,6	1890,2	25,0	1873,4	0,4	15,3
		2	234,3	266,1	140,4	25,3	1860,2				
		3	251,6	285,3	151	25,1	1869,7				
A10C-T	28	1	232,9	266,8	138,1	26,3	1806,0	26,5	1803,4	0,2	4,5
		2	234,7	268,9	139,2	26,4	1805,9				
		3	231,7	266	137,4	26,7	1798,1				
A20C-T	28	1	206,9	242	118,9	28,5	1677,4	28,4	1681,4	0,1	3,7
		2	224	261,8	129,1	28,5	1684,6				
		3	225,2	263	129,4	28,3	1682,3				
A5AA-T	28	1	266,5	290,4	159,6	18,3	2033,4	18,3	2032,1	0,1	2,4
		2	267,8	292	160,3	18,4	2029,3				
		3	253,5	276,1	151,7	18,2	2033,7				
A10AA-T	28	1	246,9	271	146,0	19,3	1971,2	19,3	1974,9	0,0	3,5
		2	256,3	281,2	151,9	19,3	1978,2				
		3	227,6	249,8	134,8	19,3	1975,2				
A20AA-T	28	1	232,0	257,5	133,9	20,6	1873,3	20,8	1869,7	0,1	3,2
		2	247,7	275,2	142,9	20,8	1868,5				
		3	234,8	261	135,5	20,9	1867,2				

Tabela AP 23 - Resultados do ensaio de porosidade aberta das argamassas a 56 dias.

Resultados do Ensaio de Porosidade Aberta											
ID Argamassa	Idade [dias]	Provete	M. Seca m [g]	M. Saturada m _{sat} [g]	M. Hidros. m _{imerso} [g]	P.A. [%]	M.V. [Kg/m ³]	Média		Desvio Padrão	
								P.A. [%]	M.V. [kg/m ³]	P.A. [%]	M.V. [kg/m ³]
ARC	56	1	240,0	263,9	147,7	20,6	2061,3	20,7	2053,5	0,1	6,7
		2	269,6	296,9	165,6	20,8	2049,2				
		3	269,1	296,2	165,2	20,7	2050,1				
A5C	56	1	244,4	277,3	149,0	25,6	1901,1	25,0	1909,4	0,6	7,3
		2	243,9	275,2	147,9	24,6	1912,1				
		3	238,3	269	144,8	24,7	1914,8				
A10C	56	1	226,6	257,7	136,7	25,7	1869,0	26,1	1856,9	0,4	13,3
		2	240,4	275	144,8	26,6	1842,7				
		3	223,7	254,9	134,8	26,0	1858,9				
A20C	56	1	218,0	255,4	128,4	29,4	1713,1	28,6	1728,8	0,9	18,3
		2	225,3	262,7	132,3	28,7	1724,3				
		3	230,8	267,2	135,5	27,6	1749,0				
ARAA	56	1	275,9	299,6	168,6	18,1	2101,9	18,1	2098,9	0,3	3,3
		2	273,7	296,9	166,8	17,8	2099,6				
		3	255,3	277,6	156	18,3	2095,3				
A5AA	56	1	262,8	287,4	158,9	19,1	2041,0	18,9	2039,4	0,2	4,2
		2	267,3	291,7	161,1	18,7	2042,6				
		3	268,7	293,5	161,7	18,8	2034,6				
A10AA	56	1	247,0	270,3	147,0	18,9	1999,2	19,1	2000,7	0,2	2,3
		2	228,6	250,4	136,3	19,1	1999,5				
		3	247,1	270,9	147,8	19,3	2003,3				
A20AA	56	1	237,5	262,3	138,2	20,0	1910,0	20,1	1904,5	0,1	7,6
		2	246	272,2	142,7	20,2	1895,8				
		3	235,5	260,4	137,2	20,2	1907,7				
A5C-T	56	1	242,7	276	146,9	25,8	1876,2	26,1	1866,8	0,3	8,4
		2	236,3	269,7	142,9	26,3	1859,8				
		3	242,5	276,6	146,8	26,3	1864,5				
A10C-T	56	1	237,4	273,8	142,5	27,7	1804,5	28,0	1796,5	0,3	7,4
		2	244,1	282,6	146,5	28,3	1789,9				
		3	231,5	267,5	138,8	28,0	1795,2				
A20C-T	56	1	222,2	260,6	129,6	29,3	1692,8	29,8	1681,1	0,4	10,1
		2	223,9	264	130,6	30,1	1675,1				
		3	224,8	265,1	131,2	30,1	1675,5				
A5AA-T	56	1	260,9	285,1	156,9	18,9	2031,0	18,6	2033,4	0,2	2,1
		2	267,5	291,7	160,5	18,4	2034,8				
		3	248,5	271,2	149,3	18,6	2034,5				
A10AA-T	56	1	221,4	243,1	132,4	19,6	1996,0	20,2	1981,1	0,6	12,9
		2	221,1	243,8	132	20,3	1973,7				
		3	255,5	282,3	153,1	20,7	1973,6				
A20AA-T	56	1	224,7	250	130,6	21,2	1878,1	21,1	1885,5	0,3	9,8
		2	230,4	256,5	134,3	21,4	1881,7				
		3	238,7	264,8	139,2	20,8	1896,7				

C.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Tabela AP 24 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.

Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade (AAC)														
ID	Idade	Pesagem	Proveito 1			Proveito 2			Proveito 3			Tempo	Média	C.C.
Argamassa	[dias]	t - Tempo [m]	M _i - Massa [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	M _i - Massa [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	M _i - Massa [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	Δt [s]	AAC [%]	Y.A. [kg/m ²]
ARC	28	0	283,2	0	0	272,1	0	0	274,4	0	0	0,0	0	0,042
		5	284,4	0,75	100	273,3	0,75	100	275,6	0,75	100	17,3	0,75	
		10	284,7	0,94	25,00	273,7	1	33,33	275,9	0,94	25	24,5	0,96	
		15	285	1,13	20,00	274,2	1,31	31,25	276,3	1,19	26,67	30,0	1,21	
		30	285,8	1,63	44,44	274,9	1,75	33,33	277	1,63	36,84	42,4	1,67	
		60	287,2	2,5	53,85	276,1	2,5	42,86	278,3	2,44	50	60,0	2,48	
		90	288,1	3,06	22,50	277,1	3,13	25,00	279,2	3	23,08	73,5	3,06	
		120	289,1	3,69	20,41	277,9	3,62	16,00	280	3,5	16,67	84,9	3,60	
		180	290,4	4,5	22,03	279,3	4,5	24,14	281,6	4,5	28,57	103,9	4,50	
		360	293,6	6,5	44,44	282,3	6,37	41,67	284,7	6,44	43,06	147,0	6,44	
		1440	302,8	12,25	88,46	291,4	12,06	89,22	294,1	12,31	91,26	293,9	12,21	
		2880	306,3	14,44	17,86	294,2	13,81	14,51	296,8	14	13,71	415,7	14,08	
		4320	306,6	14,63	1,30	294,3	13,88	0,45	297,1	14,19	1,34	509,1	14,23	
		5760	306,8	14,75	0,85	294,6	14,06	1,35	297,3	14,31	0,88	587,9	14,38	
		7200	307	14,88	0,85	294,7	14,13	0,44	297,4	14,38	0,44	657,3	14,46	
A5C	28	0	238,2	0	0	231,9	0	0	234,4	0	0	0,0	0	0,028
		5	239,2	0,63	100	233	0,69	100	235,4	0,63	100	17,3	0,65	
		10	239,6	0,88	40,00	233,3	0,88	27,27	235,8	0,88	40	24,5	0,88	
		15	239,8	1	14,29	233,6	1,06	21,43	236,1	1,06	21,43	30,0	1,04	
		30	240,2	1,25	25,00	234,3	1,5	41,18	236,7	1,44	35,29	42,4	1,40	
		60	241,1	1,81	45,00	235,2	2,06	37,50	237,6	2,00	39,13	60,0	1,96	
		90	241,7	2,19	20,69	235,9	2,50	21,21	238,3	2,44	21,88	73,5	2,38	
		120	242,3	2,56	17,14	236,5	2,88	15,00	238,9	2,8	15,38	84,9	2,75	
		180	243,2	3,13	21,95	237,5	3,5	21,74	239,8	3,38	20,00	103,9	3,33	
		360	245,3	4,44	42,00	239,7	4,87	39,29	241,7	4,56	35,19	147,0	4,63	
		1440	251,8	8,5	91,55	246,1	8,87	82,05	247,7	8,31	82,19	293,9	8,56	
		2880	256,2	11,25	32,35	250,3	11,50	29,58	251,7	10,81	30,08	415,7	11,19	
		4320	257,8	12,25	8,89	251,3	12,13	5,43	253,5	11,94	10,40	509,1	12,10	
		5760	258,1	12,44	1,53	251,6	12,31	1,55	253,8	12,13	1,57	587,9	12,29	
		7200	258,4	12,63	1,51	251,9	12,5	1,52	254,2	12,38	2,06	657,3	12,50	
A10C	28	8640	258,6	12,75	0,99	252,1	12,63	1,00	254,3	12,44	0,51	720,0	12,60	0,020
		10080	258,8	12,88	0,98	252,2	12,69	0,50	254,6	12,63	1,51	777,7	12,73	
		11520	259	13	0,97	252,3	12,75	0,49	254,7	12,69	0,50	831,4	12,81	
		0	234,1	0	0	239,4	0	0	238,1	0	0	0,0	0	
		5	235,2	0,69	100	240,2	0,5	100	240	0,56	100	17,3	0,58	
		10	235,4	0,81	18,18	240,5	0,69	37,50	240,4	0,81	44,44	24,5	0,77	
		15	235,6	0,94	15,38	240,7	0,81	18,18	240,5	0,88	7,69	30,0	0,87	
		30	236,1	1,25	33,33	241	1	23,08	240,9	1,13	28,57	42,4	1,13	
		60	236,7	1,63	30,00	241,5	1,31	31,25	241,4	1,44	27,78	60,0	1,46	
		90	237,3	2,00	23,08	241,8	1,50	14,29	241,9	1,75	21,74	73,5	1,75	
		120	237,6	2,19	9,37	242,2	1,75	16,67	242,2	1,94	10,71	84,9	1,96	
		180	238,3	2,63	20,00	242,8	2,13	21,43	242,9	2,38	22,58	103,9	2,38	
		360	239,8	3,56	35,71	244,2	3,00	41,18	244,2	3,19	34,21	147,0	3,25	
		1440	244,1	6,25	75,44	248,7	5,81	93,75	248,6	5,94	86,27	293,9	6,00	
		2880	247,2	8,19	31,00	251,9	7,81	34,41	251,6	7,81	31,58	415,7	7,94	
A20C	28	4320	249,3	9,50	16,03	253,9	9,06	16,00	253,7	9,13	16,80	509,1	9,23	0,019
		5760	250,8	10,44	9,87	255,4	10,00	10,34	255,2	10,06	10,27	587,9	10,17	
		7200	252	11,19	7,19	256,6	10,75	7,50	256,4	10,81	7,45	657,3	10,92	
		8640	252,8	11,69	4,47	257,5	11,31	5,23	257,4	11,44	5,78	720,0	11,48	
		10080	253,2	11,94	2,14	258,2	11,75	3,87	258,1	11,88	3,83	777,7	11,85	
		11520	253,6	12,19	2,09	258,7	12,06	2,66	258,5	12,13	2,11	831,4	12,13	
		0	221,3	0	0	213,7	0	0	204,7	0	0	0,0	0	
		5	222,4	0,81	100	214,7	0,63	100	205,8	0,69	100	17,3	0,71	
		10	222,6	1,00	23,08	214,9	0,75	20,00	206,1	0,88	27,27	24,5	0,88	
		15	222,9	1,31	31,25	215,1	0,88	16,67	206,2	0,94	7,14	30,0	1,04	
		30	223,4	1,69	28,57	215,5	1,13	28,57	206,7	1,25	33,33	42,4	1,35	
		60	224	1,94	14,81	216	1,44	27,78	207,3	1,63	30	60,0	1,67	
		90	224,4	2,19	12,90	216,3	1,63	13,04	207,7	1,88	15,38	73,5	1,90	
		120	224,8	2,56	17,14	216,7	1,88	15,38	208	2,06	10,00	84,9	2,17	
		180	225,4	3,31	29,27	217,2	2,19	16,67	208,7	2,5	21,21	103,9	2,67	
A20C	28	360	226,6	3,31	29,27	218,4	2,94	34,29	210	3,31	32,50	147,0	3,19	0,019
		1440	230,6	5,81	75,47	221,9	5,13	74,47	214,1	5,88	77,36	293,9	5,60	
		2880	233,4	7,56	30,11	224,6	6,81	32,93	217,2	7,81	32,98	415,7	7,40	
		4320	235,3	8,75	15,70	226,4	7,94	16,51	219,3	9,13	16,80	509,1	8,60	
		5760	236,8	9,69	10,71	227,8	8,81	11,02	220,8	10,06	10,27	587,9	9,52	
		7200	238,1	10,5	8,39	228,9	9,5	7,80	221,9	10,75	6,83	657,3	10,25	
		8640	239	11,06	5,36	229,7	10	5,26	222,5	11,13	3,49	720,0	10,73	
		10080	239,7	11,5	3,95	230,5	10,5	5,00	222,9	11,38	2,25	777,7	11,13	
		11520	240,2	11,81	2,72	231	10,81	2,98	223,1	11,5	1,10	831,4	11,38	

Tabela AP 25 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.

Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade (AAC)														
ID	Idade	Paraqem	Praveto 1			Praveto 2			Praveto 3			Tempo	Média	C.C.
Argamassa	[dias]	t-Tempo[m]	M ₁ -Massa[a]	AAC[kq/m ²]	ΔMi[°C]	M ₁ -Massa[a]	AAC[kq/m ²]	ΔMi[°C]	M ₁ -Massa[a]	AAC[kq/m ²]	ΔMi[°C]	t [s]	AAC[°C]	V.A. [kq/m ²]
AFAA	28	0	249,1	0	0	261,2	0	0	277,2	0	0	0,0	0	0,038
		5	250,3	0,75	100	262,2	0,625	100	278,3	0,69	100	17,3	0,69	
		10	250,6	0,94	25,00	262,6	0,88	40,00	278,6	0,88	27,27	24,5	0,90	
		15	251	1,19	26,67	263	1,13	28,57	278,9	1,06	21,43	30,0	1,13	
		30	251,5	1,5	26,32	263,5	1,44	27,78	279,5	1,44	35,29	42,4	1,46	
		60	252,9	2,38	58,33	264,7	2,19	52,17	280,6	2,13	47,83	60,0	2,23	
		90	253,7	2,88	21,05	265,6	2,75	25,71	281,4	2,62	23,53	73,5	2,75	
		120	254,5	3,28	17,39	266,4	3,25	18,18	282,1	3,06	16,67	84,9	3,22	
		180	255,9	4,25	25,92	267,6	4,00	23,08	283,4	3,87	26,53	102,9	4,04	
		360	258,9	6,12	44,12	270,4	5,75	43,75	286,2	5,63	45,16	147,0	5,82	
		1440	263,2	8,88	44,90	275,8	9,13	58,70	292,6	9,63	71,11	293,9	9,21	
		2880	263,6	9,06	2,11	276,2	9,38	2,74	293	9,88	2,60	415,7	9,44	
		4320	263,8	9,19	1,38	276,3	9,44	0,67	293,2	10,00	1,27	509,1	9,54	
		5760	263,8	9,19	0,00	276,5	9,56	1,32	293,2	10,00	0,00	587,9	9,58	
		7200	263,9	9,22	0,34	276,5	9,56	0,00	293,3	10,03	0,31	657,3	9,60	
		8640	263,9	9,25	0,34	276,5	9,56	0,00	293,3	10,06	0,31	720,0	9,63	
		10080	263,9	9,25	0,00	276,5	9,5625	0,00	293,3	10,06	0,00	777,7	9,63	
		11520	264	9,31	0,68	276,5	9,56	0,00	293,4	10,12	0,62	831,4	9,67	
		12960	264	9,31	0,68	276,6	9,63	0,65	293,4	10,12	0,62	881,8	9,69	
A5AA	28	0	262,1	0	0	273,2	0	0	273,6	0	0	0,0	0	0,026
		5	263,1	0,69	100	274,3	0,63	100	274,7	0,69	100	17,3	0,67	
		10	263,2	0,81	18,18	274,5	0,75	20,00	274,9	0,81	18,18	24,5	0,79	
		15	263,4	1,00	23,08	274,7	0,87	16,67	275,1	0,94	15,38	30,0	0,94	
		30	263,7	1,44	43,75	275	1,06	21,43	275,5	1,19	26,67	42,4	1,23	
		60	264,4	1,75	21,74	275,8	1,56	47,06	276,3	1,69	42,11	60,0	1,67	
		90	264,9	2,00	14,29	276,4	1,94	24,00	276,8	2,00	18,52	73,5	1,98	
		120	265,3	2,27	18,75	276,8	2,19	12,90	277,2	2,25	12,50	84,9	2,27	
		180	265,9	3,44	44,74	277,5	3,62	20,00	278	3,75	22,22	102,9	3,94	
		360	267,6	3,44	44,74	279,3	3,75	42,86	279,8	3,87	40,91	147,0	3,69	
		1440	272,9	6,75	96,26	285,1	7,38	96,67	285,8	7,62	96,77	293,9	7,25	
		2880	276,6	9,06	34,26	288,6	9,56	29,66	288,9	9,56	25,41	415,7	9,40	
		4320	277,5	9,62	6,21	289,2	9,94	3,92	289,7	10,06	5,23	509,1	9,87	
		5760	277,9	9,87	2,60	289,5	10,13	1,89	289,9	10,19	1,24	587,9	10,06	
		7200	278,2	10,03	1,58	289,7	10,25	1,23	290,1	10,31	1,23	657,3	10,20	
		8640	278,4	10,19	1,56	289,9	10,38	1,22	290,3	10,44	1,21	720,0	10,33	
		10080	278,4	10,19	0,00	290	10,44	0,60	290,3	10,44	0,00	777,7	10,38	
		11520	278,7	10,38	1,84	290,2	10,56	1,20	290,5	10,56	1,20	831,4	10,50	
		12960	278,7	10,38	0,00	290,3	10,63	0,59	290,5	10,56	0,00	881,8	10,52	
A10AA	28	0	245	0	0	252,9	0	0	256,4	0	0	0,0	0	0,019
		5	245,7	0,44	100	253,6	0,44	100	257,2	0,50	100	17,3	0,46	
		10	245,9	0,56	28,57	253,7	0,50	14,29	257,5	0,69	37,50	24,5	0,58	
		15	246	0,63	11,11	253,8	0,56	12,50	257,5	0,69	0,00	30,0	0,63	
		30	246,3	0,81	30,00	254,1	0,75	33,33	257,7	0,81	18,18	42,4	0,79	
		60	246,8	1,13	38,46	254,6	1,06	41,67	258,2	1,13	38,46	60,0	1,10	
		90	247,2	1,27	22,22	254,9	1,25	17,65	258,6	1,38	22,22	73,5	1,33	
		120	247,5	1,56	13,64	255,3	1,50	20,00	258,9	1,56	13,64	84,9	1,54	
		180	248,1	1,94	24,00	255,8	1,81	20,83	259,5	1,94	24,00	102,9	1,90	
		360	249,4	2,75	41,94	257,2	2,69	48,28	260,8	2,75	41,94	147,0	2,73	
		1440	253,8	5,5	100,00	261,6	5,44	102,33	265,4	5,63	104,55	293,9	5,52	
		2880	257	7,50	36,36	265	7,56	39,08	269	7,88	40,00	415,7	7,65	
		4320	258,8	8,63	15,00	266,8	8,69	14,88	270,8	9,00	14,29	509,1	8,77	
		5760	259,8	9,25	7,25	267,9	9,37	7,91	271,9	9,69	7,64	587,9	9,44	
		7200	260,3	9,56	3,38	268,4	9,69	3,33	272,5	10,03	3,55	657,3	9,76	
		8640	260,8	9,88	3,27	268,9	10,00	3,23	273	10,38	3,43	720,0	10,08	
		10080	261,1	10,06	1,90	269,3	10,25	2,50	273,3	10,56	1,81	777,7	10,29	
		11520	261,4	10,25	1,86	269,5	10,38	1,22	273,4	10,63	0,59	831,4	10,42	
		12960	261,6	10,38	1,22	269,7	10,50	1,20	273,6	10,75	1,18	881,8	10,54	
A20AA	28	0	237,2	0	0	249,3	0	0	246,9	0	0	0,0	0	0,017
		5	238,2	0,63	100	250,1	0,50	100	247,7	0,50	100	17,3	0,54	
		10	238,3	0,75	20,00	250,2	0,56	12,50	247,8	0,56	12,50	24,5	0,62	
		15	238,5	0,87	16,67	250,3	0,63	11,11	247,9	0,63	11,11	30,0	0,71	
		30	238,7	1,12	28,57	250,5	0,75	20,00	248,2	0,81	30,00	42,4	0,90	
		60	239,1	1,31	16,67	250,8	0,94	25,00	248,5	1,00	23,08	60,0	1,08	
		90	239,4	1,44	9,52	251,1	1,12	20,00	248,9	1,25	25,00	73,5	1,27	
		120	239,6	1,75	21,74	251,4	1,31	16,67	249,1	1,37	10,00	84,9	1,48	
		180	240,1	2,37	35,71	251,9	1,63	23,81	249,7	1,75	27,27	102,9	1,92	
		360	241,1	2,27	35,71	253	2,31	42,31	250,8	2,44	39,29	147,0	2,38	
		1440	244,8	4,69	97,37	256,9	4,75	105,41	254,8	4,94	102,56	293,9	4,79	
		2880	247,9	6,63	41,33	260	6,69	40,79	258	6,94	40,51	415,7	6,75	
		4320	249,6	7,69	16,04	262,1	8,00	19,63	259,9	8,12	17,12	509,1	7,94	
		5760	250,9	8,50	10,57	263,5	8,87	10,94	261,3	9,00	10,77	587,9	8,79	
		7200	251,7	9	5,88	264,4	9,44	6,34	262,3	9,59	6,60	657,3	9,34	
		8640	252,5	9,50	5,56	265,3	10	5,96	263,2	10,19	6,19	720,0	9,90	
		10080	253	9,81	3,29	265,9	10,375	3,75	263,8	10,56	3,68	777,7	10,25	
		11520	253,4	10,06	2,55	266,4	10,69	3,01	264,3	10,88	2,96	831,4	10,54	
		12960	253,8	10,31	2,48	266,8	10,94	2,34	264,7	11,13	2,30	881,8	10,79	

Tabela AP 26 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.

Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade (AAC)																
ID	Idade	Foraço	Prova 1			Prova 2			Prova 3			Tempo	Média	C.C.	V.A. (kg/m ²)	
Argamassa	[dias]	t-Tempo[m]	M _i -M _{azra} [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	M _i -M _{azra} [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	M _i -M _{azra} [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	h [x]	AAC [%]	h ₀ [m]	Média	D.P.
A5C-T	28	0	251,2	0	0	233,6	0	0	251	0	0	0,0	0	0,055	11,71	0,10
		5	252,9	1,06	100	235,4	1,125	100	252,4	0,88	100	17,3	1,02			
		10	253,4	1,38	29,41	235,9	1,44	27,78	252,8	1,13	28,57	24,5	1,31			
		15	254	1,75	27,27	236,5	1,81	26,09	253,2	1,37	22,22	30,0	1,65			
		30	254,5	2,06	17,86	237	2,125	17,24	253,7	1,69	22,73	42,4	1,96			
		60	255,4	2,63	27,27	237,8	2,63	23,53	254,4	2,13	25,93	60,0	2,46			
		90	256	3,00	14,29	238,4	3,00	14,29	255	2,5	17,65	73,5	2,83			
		120	256,5	3,31	10,42	238,9	3,31	10,42	255,4	2,75	10,00	84,9	3,13			
		180	257,2	3,75	13,21	239,6	3,75	13,21	256	3,13	13,64	103,9	3,54			
		360	258,6	4,63	23,33	241	4,63	23,33	257,5	4,06	30,00	147,0	4,44			
		1440	262,7	7,19	55,41	245,1	7,19	55,41	261,4	6,50	60,00	293,9	6,96			
		2880	265	8,63	20,00	247,5	8,69	20,87	264	8,13	25,00	415,7	8,48			
		4320	266,4	9,50	10,14	248,9	9,56	10,07	265,6	9,13	12,31	509,1	9,40			
		5760	267,4	10,13	6,58	250	10,25	7,19	266,8	9,88	3,22	587,9	10,08			
		7200	268,1	10,56	4,32	250,7	10,69	4,27	267,6	10,38	5,06	657,3	10,54			
		8640	268,6	10,88	2,96	251,3	11,06	3,51	268,3	10,81	4,22	720,0	10,92			
		10080	269	11,13	2,30	251,8	11,38	2,82	268,8	11,13	2,89	777,7	11,21			
		11520	269,5	11,44	2,81	252,2	11,63	2,20	269,3	11,44	2,81	821,4	11,50			
		12960	269,8	11,63	1,64	252,5	11,81	1,61	269,7	11,69	2,19	881,8	11,71			
A10C-T	28	0	232	0	0	233,9	0	0	230,8	0	0	0,0	0	0,061	12,04	0,52
		5	233,7	1,37	100	235,4	0,94	100	232,7	1,19	100	17,3	1,17			
		10	234,2	1,75	27,27	235,9	1,25	33,33	233,1	1,44	21,05	24,5	1,48			
		15	234,8	2,13	21,43	236,4	1,56	25,00	233,6	1,75	21,74	30,0	1,81			
		30	235,4	2,69	26,47	236,9	1,88	20,00	234,1	2,06	17,86	42,4	2,21			
		60	236,3	3,06	13,95	237,7	2,37	26,67	234,9	2,56	24,24	60,0	2,67			
		90	236,9	3,31	8,16	238,2	2,69	13,16	235,5	2,94	14,63	73,5	2,98			
		120	237,3	3,75	13,21	238,6	2,94	9,30	235,9	3,19	8,51	84,9	3,29			
		180	238	4,63	23,33	239,3	3,38	14,89	236,6	3,625	13,73	103,9	3,88			
		360	239,4	4,63	23,33	240,6	4,19	24,07	238	4,50	24,14	147,0	4,44			
		1440	243,4	7,13	54,05	244,1	6,37	52,24	241,8	6,88	52,78	293,9	6,79			
		2880	246	8,75	22,81	246,4	7,81	22,55	244,3	8,44	22,73	415,7	8,22			
		4320	247,7	9,81	12,14	248	8,81	12,80	245,9	9,44	11,85	509,1	9,35			
		5760	248,9	10,56	7,64	249,1	9,50	7,80	247,2	10,25	8,61	587,9	10,10			
		7200	249,9	11,19	5,92	250	10,06	5,92	248,2	10,88	6,10	657,3	10,71			
		8640	250,7	11,69	4,47	250,7	10,5	4,35	249	11,38	4,60	720,0	11,19			
		10080	251,2	12	2,67	251,3	10,88	3,57	249,7	11,81	3,35	777,7	11,56			
		11520	251,6	12,25	2,08	251,9	11,25	3,45	250,2	12,13	2,65	821,4	11,88			
		12960	251,7	12,31	0,51	252,2	11,44	1,67	250,6	12,38	2,06	881,8	12,04			
A20C-T	28	0	206,3	0	0	223,3	0	0	224,5	0	0	0,0	0	0,047	9,27	0,40
		5	207,8	0,94	100	224,9	1	100	226	0,94	100	17,3	0,96			
		10	208,1	1,12	20,00	225,2	1,19	18,75	226,3	1,13	20,00	24,5	1,15			
		15	208,5	1,37	22,22	225,6	1,44	21,05	226,6	1,31	16,67	30,0	1,37			
		30	208,8	1,56	13,64	226	1,69	17,39	227	1,56	19,05	42,4	1,60			
		60	209,4	1,94	24,00	226,5	2,00	18,52	227,6	1,94	24,00	60,0	1,96			
		90	209,8	2,19	12,90	226,9	2,25	12,50	228	2,19	12,90	73,5	2,21			
		120	210,1	2,37	8,57	227,3	2,50	11,11	228,3	2,38	8,57	84,9	2,42			
		180	210,5	2,62	10,53	227,7	2,75	10,00	228,8	2,69	13,16	103,9	2,69			
		360	211,5	3,25	23,81	228,8	3,44	25,00	229,8	3,31	23,26	147,0	3,33			
		1440	214,3	5	53,85	231,7	5,25	52,73	232,8	5,19	56,60	293,9	5,15			
		2880	216	6,06	21,25	233,5	6,37	21,43	234,8	6,44	24,10	415,7	6,29			
		4320	217,1	6,75	11,34	234,7	7,12	11,76	236	7,19	11,65	509,1	7,02			
		5760	217,9	7,25	7,41	235,6	7,69	7,89	236,9	7,75	7,93	587,9	7,56			
		7200	218,5	7,62	5,17	236,3	8,13	5,69	237,7	8,25	6,45	657,3	8,00			
		8640	219,1	8,00	4,92	236,9	8,50	4,62	238,3	8,63	4,55	720,0	8,38			
		10080	219,6	8,31	3,91	237,4	8,81	3,68	238,8	8,94	3,62	777,7	8,69			
		11520	220,1	8,62	3,76	237,9	9,13	3,55	239,3	9,25	3,50	821,4	9,00			
		12960	220,4	8,81	2,17	238,4	9,44	3,42	239,8	9,56	3,38	881,8	9,27			
A5AA-T	28	0	266,8	0	0	268,1	0	0	253,9	0	0	0,0	0	0,030	10,58	0,34
		5	268	0,87	100	269,3	0,75	100	255,1	0,75	100	17,3	0,79			
		10	268,2	1,06	21,43	269,5	0,875	16,67	255,3	0,88	16,67	24,5	0,94			
		15	268,5	1,25	17,65	269,7	1,00	14,29	255,5	1,00	14,29	30,0	1,08			
		30	268,8	1,69	35,00	270,1	1,25	25,00	255,9	1,25	25,00	42,4	1,40			
		60	269,5	2,06	22,22	270,7	1,62	30,00	256,5	1,63	30	60,0	1,77			
		90	270,1	2,31	12,12	271,3	2,00	23,08	257,1	2,00	23,08	73,5	2,10			
		120	270,5	2,87	24,32	271,8	2,31	15,63	257,6	2,31	15,62	84,9	2,50			
		180	271,4	4,00	29,13	272,6	2,81	21,62	258,4	2,81	21,62	103,9	3,21			
		360	273,2	4,00	29,13	274,3	3,87	37,78	260,2	3,94	40,00	147,0	3,94			
		1440	278,8	7,50	87,50	279,4	7,06	82,26	265,3	7,13	80,95	293,9	7,23			
		2880	282,3	9,69	29,17	283,2	9,44	33,63	268,6	9,19	28,95	415,7	9,44			
		4320	283,1	10,19	5,16	284,4	10,19	7,95	269,3	9,63	4,76	509,1	10,00			
		5760	283,4	10,38	1,84	284,7	10,38	1,84	269,6	9,81	1,95	587,9	10,19			
		7200	283,6	10,5	1,20	284,9	10,5	1,20	269,8	9,94	1,27	657,3	10,31			
		8640	283,7	10,56	0,60	285	10,56	0,60	269,9	10,00	0,63	720,0	10,38			
		10080	283,9	10,69	1,18	285,1	10,63	0,59	270	10,06	0,63	777,7	10,46			
		11520	283,9	10,69	0,00	285,3	10,75	1,18	270,1	10,13	0,62	821,4	10,52			
		12960	284	10,75	0,58	285,4	10,81	0,58	270,2	10,19	0,62	881,8	10,58			

Tabela AP 27 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.

Resultados do Ensaio de Absorção de água por Capilaridade (AAC)														
ID	Idade	Paraqom	Prova 1			Prova 2			Prova 3			Tempo	Média	C.C.
Argamassa	[dias]	t-Tempo[m]	M ₁ -Mazra[q]	AAC[kq/m ²]	ΔMi[Δ]	M ₁ -Mazra[q]	AAC[kq/m ²]	ΔMi[Δ]	M ₁ -Mazra[q]	AAC[kq/m ²]	ΔMi[Δ]	Δt[s]	AAC[Δ]	
														V.A. [kq/m ²]
														Média
														D.P.
A10AA-T	28	0	247,1	0	0	256,5	0	0	228,4	0	0	0,0	0	0,027
		5	248,1	0,63	100	257,2	0,31	100	230,8	1,50	100	17,3	0,92	
		10	248,2	0,69	10,00	258,1	1,00	23,08	230,9	1,56	4,17	24,5	1,03	
		15	248,4	0,81	18,18	258,2	1,13	12,50	231,1	1,69	3,00	30,0	1,21	
		30	249,7	1	23,08	258,6	1,31	16,67	231,5	1,94	14,81	42,4	1,42	
		60	249,3	1,38	37,50	259,2	1,69	28,57	232,1	2,31	19,35	60,0	1,79	
		90	249,7	1,63	18,18	259,7	2,00	18,52	232,5	2,56	10,81	73,5	2,06	
		120	250	1,81	11,54	260,2	2,31	15,63	232,9	2,81	9,76	84,9	2,31	
		180	250,6	2,19	20,69	260,8	2,69	16,22	233,6	3,25	15,56	103,9	2,71	
		360	251,9	3,00	37,14	262,4	3,69	37,21	235	4,13	26,92	147,0	3,60	
		1440	256,2	5,69	89,58	267,2	5,69	81,26	239,1	6,69	62,12	293,9	6,35	
		2880	259,2	7,56	32,97	270,6	8,81	31,79	241,9	8,44	26,17	415,7	8,27	
		4320	261,5	9,00	19,01	272,2	9,31	11,35	243	9,13	5,15	509,1	9,31	
		5760	262,6	9,69	7,64	273	10,21	5,10	243,3	9,31	2,05	587,9	9,77	
		7200	263,2	10,06	3,87	273,5	10,63	3,03	243,7	9,56	2,68	657,3	10,03	
		8640	263,6	10,31	2,48	273,8	10,81	1,76	243,8	9,63	0,65	720,0	10,25	
		10080	263,9	10,50	1,82	274	10,94	1,16	243,8	9,63	0,00	777,7	10,35	
		11520	264,3	10,75	2,38	274,2	11,06	1,14	243,8	9,63	0,00	831,4	10,48	
		12960	264,6	10,94	1,74	274,3	11,13	0,56	243,9	9,69	0,65	881,8	10,53	
A20AA-T	28	0	232,1	0	0	247,9	0	0	235	0	0	0,0	0	0,020
		5	233	0,63	100	249	0,69	100	236,2	0,75	100	17,3	0,69	
		10	233,1	0,69	10,00	249,1	0,75	9,09	236,4	0,88	16,67	24,5	0,77	
		15	233,2	0,81	18,18	249,2	0,88	16,67	236,5	0,94	7,14	30,0	0,88	
		30	233,4	1,06	30,77	249,5	1,00	14,29	236,7	1,06	13,33	42,4	1,04	
		60	233,8	1,25	17,65	250	1,31	31,25	237,2	1,37	29,41	60,0	1,31	
		90	234,1	1,44	15,00	250,2	1,50	14,29	237,5	1,56	13,64	73,5	1,50	
		120	234,4	1,81	26,09	250,6	1,69	12,50	237,8	1,75	12,00	84,9	1,75	
		180	235	2,50	37,93	251,2	2,06	22,22	238,3	2,06	17,86	103,9	2,21	
		360	236,1	2,50	37,93	252,4	2,81	36,36	239,4	2,75	33,33	147,0	2,69	
		1440	239,6	4,69	87,50	256	5,06	80,00	243	5,00	81,82	293,9	4,92	
		2880	242,2	6,31	34,67	258,8	6,81	34,57	245,6	6,63	32,50	415,7	6,58	
		4320	243,8	7,31	15,94	260,5	7,88	15,60	247,2	7,62	15,09	509,1	7,60	
		5760	245	8,06	10,26	261,8	8,69	10,32	248,5	8,44	10,66	587,9	8,40	
		7200	245,9	8,63	6,98	262,9	9,37	7,91	249,5	9,06	7,41	657,3	9,02	
		8640	246,8	9,19	6,52	263,8	9,94	6,00	250,3	9,56	5,52	720,0	9,56	
		10080	247,4	9,56	4,08	264,4	10,31	3,77	250,8	9,88	3,27	777,7	9,92	
		11520	248,1	10,00	4,58	265	10,69	3,64	251,4	10,25	3,80	831,4	10,31	
		12960	248,6	10,31	3,13	265,6	11,06	3,81	252	10,63	3,66	881,8	10,67	
AFC	56	0	239,7	0	0	269,2	0	0	268,8	0	0	0,0	0	0,059
		5	241,8	1,69	100	271,4	1,37	100	270,8	1,25	100	17,3	1,44	
		10	242,4	2,13	25,93	271,9	1,69	22,73	271,2	1,50	20,00	24,5	1,77	
		15	243,1	2,69	26,47	272,6	2,13	25,93	271,8	1,88	25,00	30,0	2,23	
		30	244	3,44	27,91	273,4	2,62	23,52	272,7	2,44	30,00	42,4	2,83	
		60	245,2	4,06	18,18	274,8	3,50	33,33	273,9	3,19	30,77	60,0	3,58	
		90	246,2	4,63	13,85	275,8	4,13	17,86	274,9	3,81	19,61	73,5	4,19	
		120	247,1	5,50	18,92	276,6	4,63	12,12	275,6	4,25	11,48	84,9	4,79	
		180	248,5	7,38	34,09	278	5,50	18,92	276,9	5,06	19,12	103,9	5,98	
		360	251,5	7,38	34,09	281,1	7,44	35,23	279,7	6,81	34,57	147,0	7,21	
		1440	258,7	11,88	61,02	290,3	13,19	77,31	288	12,00	76,15	293,9	12,35	
		2880	259,2	12,19	2,63	291,5	13,94	5,69	290,1	13,31	10,94	415,7	13,15	
		4320	259,4	12,31	1,03	291,7	14,06	0,90	290,3	13,44	9,94	509,1	13,27	
		5760	259,6	12,44	1,02	291,9	14,19	0,89	290,5	13,56	0,93	587,9	13,40	
		7200	259,7	12,5	0,50	292	14,25	0,44	290,6	13,63	0,46	657,3	13,46	
		8640	259,8	12,56	0,50	292,1	14,31	0,44	290,7	13,69	0,46	720,0	13,52	
		10080	259,8	12,56	0,00	292,1	14,31	0,00	290,8	13,75	0,46	777,7	13,54	
		11520	259,9	12,63	0,50	292,2	14,38	0,44	290,9	13,81	0,45	831,4	13,60	
		12960	259,9	12,63	0,00	292,3	14,44	0,43	291	13,88	0,45	881,8	13,65	
AFC	56	0	244,7	0	0	244,1	0	0	238,6	0	0	0,0	0	0,025
		5	246	1,00	100	245,4	0,81	100	239,9	0,81	100	17,3	0,88	
		10	246,3	1,19	18,75	245,8	1,0625	30,77	240,1	0,94	15,38	24,5	1,06	
		15	246,6	1,50	26,22	246	1,19	11,76	240,3	1,06	13,33	30,0	1,25	
		30	247,1	1,88	25,00	246,5	1,50	26,32	240,9	1,44	35,29	42,4	1,60	
		60	247,7	2,19	16,67	247,1	1,88	25,00	241,5	1,81	26,09	60,0	1,96	
		90	248,2	2,44	11,43	247,6	2,19	16,67	242	2,13	17,24	73,5	2,25	
		120	248,6	2,88	17,95	248	2,44	11,43	242,4	2,38	11,76	84,9	2,56	
		180	249,3	3,88	34,78	248,8	2,94	20,51	243,1	2,81	18,42	103,9	3,21	
		360	250,9	3,88	34,78	250,5	4,00	36,17	244,7	3,81	35,56	147,0	3,90	
		1440	256,2	7,19	85,48	256,1	7,50	87,50	250	7,13	86,89	293,9	7,27	
		2880	260	9,56	33,04	260,2	10,06	34,17	253,8	9,50	33,33	415,7	9,71	
		4320	262,3	11,00	15,03	262,6	11,56	14,91	256,1	10,94	15,13	509,1	11,17	
		5760	263,6	11,81	7,39	263,5	12,13	4,86	257,2	11,63	6,29	587,9	11,85	
		7200	264,1	12,125	2,65	263,9	12,375	2,06	257,6	11,88	2,15	657,3	12,13	
		8640	264,4	12,31	1,55	264,1	12,50	1,01	257,9	12,06	1,58	720,0	12,29	
		10080	264,8	12,56	2,03	264,4	12,69	1,50	258,2	12,25	1,55	777,7	12,50	
		11520	264,9	12,63	0,50	264,6	12,81	0,99	258,4	12,38	1,02	831,4	12,60	
		12960	265,1	12,75	0,99	264,8	12,94	0,98	258,6	12,5	1,01	881,8	12,73	

Tabela AP 28 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.

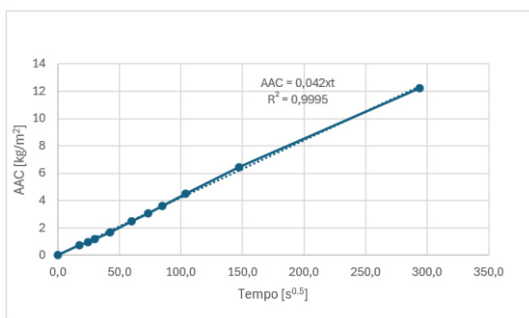
Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade (AAC)													
ID	Idade	Foraço	Prova 1			Prova 2			Prova 3			Tempo	Média
Argamassa	[dias]	t-Tempo[m]	M ₁ -Mazra [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	M ₁ -Mazra [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	M ₁ -Mazra [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	Δx [g]	AAC [%]
A10C	56	0	226,9	0	0	240,6	0	0	223,9	0	0	0,0	0
		5	228,1	0,88	100	241,6	0,63	100	225,1	0,75	100	17,3	0,75
		10	228,3	0,94	7,14	241,8	0,75	20,00	225,2	0,81	3,33	24,5	0,83
		15	228,4	1,25	33,33	241,9	0,81	8,33	225,4	0,94	15,38	30,0	1,00
		30	228,9	1,50	20,00	242,2	1,00	23,08	225,8	1,19	26,67	42,4	1,23
		60	229,3	1,75	16,67	242,6	1,25	25,00	226,3	1,50	26,32	60,0	1,50
		90	229,7	1,94	10,71	242,9	1,44	15,00	226,6	1,69	12,50	73,5	1,69
		120	230	2,25	16,13	243,1	1,56	8,70	226,9	1,88	11,11	84,9	1,90
		180	230,5	3,00	33,33	243,6	1,88	20,00	227,4	2,19	16,67	103,9	2,35
		360	231,7	3,00	33,33	244,5	2,44	30,00	228,4	2,81	28,57	147,0	2,75
		1440	235,9	5,63	87,50	248,1	4,69	92,31	232,1	5,12	82,22	293,9	5,15
		2880	239,3	7,75	37,78	251	6,50	38,67	235	6,94	35,27	415,7	7,06
		4320	241,6	9,19	18,89	253,1	7,81	20,19	236,8	8,06	16,22	509,1	8,35
		5760	243,3	10,25	11,56	254,8	8,88	13,60	238,2	8,94	10,85	587,9	9,35
		7200	244,1	10,75	4,88	256,1	9,69	9,15	239,4	9,69	8,39	657,3	10,04
		8640	244,5	11,00	2,33	257,1	10,31	6,45	240,3	10,25	5,31	720,0	10,52
		10080	244,8	11,19	1,70	257,9	10,81	4,85	240,8	10,56	3,05	777,7	10,85
		11520	245	11,31	1,12	258,4	11,13	2,89	241,2	10,81	2,37	821,4	11,08
		12960	245,2	11,44	1,10	258,7	11,31	1,69	241,4	10,94	1,16	881,3	11,23
A20C	56	0	218,7	0	0	225,8	0	0	231,1	0	0	0,0	0
		5	219,7	0,81	100	226,7	0,56	100	232,3	0,75	100	17,3	0,71
		10	220	0,94	15,38	227	0,75	33,33	232,5	0,88	16,67	24,5	0,85
		15	220,2	1,19	26,67	227,1	0,81	8,33	232,7	1,00	14,29	30,0	1,00
		30	220,6	1,56	31,58	227,6	1,12	38,46	233	1,19	18,75	42,4	1,29
		60	221,2	1,81	16,00	228	1,37	22,22	233,5	1,50	26,32	60,0	1,56
		90	221,6	2,00	10,34	228,4	1,63	18,18	233,7	1,63	8,33	73,5	1,75
		120	221,9	2,31	15,62	228,6	1,75	7,69	234	1,81	11,54	84,9	1,96
		180	222,4	3,06	32,43	229,1	2,06	17,86	234,4	2,06	13,79	103,9	2,40
		360	223,6	3,06	32,43	230,3	2,81	36,36	235,4	2,69	30,30	147,0	2,85
		1440	227,9	5,75	87,76	234	5,12	82,22	238,8	4,81	79,07	293,9	5,23
		2880	231,1	7,75	34,78	236,8	6,88	34,15	241,3	6,38	32,47	415,7	7,00
		4320	233,1	9,00	16,13	239,5	7,94	15,45	243,1	7,50	17,65	509,1	8,15
		5760	234,7	10,00	11,11	240	8,87	11,81	244,5	8,38	11,67	587,9	9,08
		7200	235,8	10,69	6,88	241,1	9,56	7,75	245,6	9,06	8,21	657,3	9,77
		8640	236,4	11,06	3,51	242,1	10,19	6,54	246,5	9,63	6,21	720,0	10,29
		10080	236,8	11,31	2,26	242,8	10,63	4,29	247,3	10,13	5,19	777,7	10,69
		11520	237,1	11,50	1,66	243,4	11,00	3,53	247,9	10,50	3,70	821,4	11,00
		12960	237,3	11,63	1,09	243,7	11,19	1,70	248,4	10,81	2,98	881,3	11,21
A3AA	56	0	274	0	0	272	0	0	253,8	0	0	0,0	0
		5	276	1,63	100	273,8	1,13	100	255,7	1,19	100	17,3	1,31
		10	276,6	1,94	19,23	274,5	1,56	38,89	256,4	1,62	36,84	24,5	1,71
		15	277,1	2,69	38,71	275,1	1,94	24,00	256,9	1,94	19,23	30,0	2,19
		30	278,3	3,63	34,88	276,3	2,69	38,71	258	2,62	35,48	42,4	2,98
		60	279,8	4,38	20,69	278	3,75	39,53	259,6	3,63	38,10	60,0	3,92
		90	281	5,00	14,29	279,3	4,56	21,67	260,9	4,44	22,41	73,5	4,67
		120	282	6,06	21,25	280,3	5,19	13,70	262	5,12	15,49	84,9	5,46
		180	283,7	8,56	41,24	282,1	6,31	21,69	263,9	6,31	23,17	103,9	7,06
		360	287,7	8,56	41,24	285,9	8,69	37,62	267,5	8,56	35,64	147,0	8,60
		1440	290,1	10,05	17,52	287,7	9,81	12,95	268,6	9,25	8,03	293,9	9,71
		2880	290,4	10,25	1,86	288,1	10,06	2,55	268,9	9,44	2,03	415,7	9,92
		4320	290,4	10,25	0,00	288,1	10,06	0,00	269	9,50	0,66	509,1	9,94
		5760	290,7	10,44	1,83	288,3	10,19	1,24	269,1	9,56	0,66	587,9	10,06
		7200	290,7	10,44	0,00	288,3	10,19	0,00	269,1	9,56	0,00	657,3	10,06
		8640	290,8	10,50	0,60	288,4	10,25	0,61	269,2	9,62	0,65	720,0	10,13
		10080	290,9	10,56	0,60	288,5	10,31	0,61	269,3	9,69	0,65	777,7	10,19
		11520	290,9	10,56	0,00	288,5	10,31	0,00	269,3	9,69	0,00	821,4	10,19
		12960	290,9	10,56	0,00	288,5	10,31	0,00	269,4	9,75	0,65	881,3	10,21
A5AA	56	0	261,3	0	0	265,7	0	0	267,1	0	0	0,0	0
		5	262,7	1,19	100	267,1	0,88	100	268,6	0,94	100	17,3	1,00
		10	263,2	1,37	15,79	267,5	1,13	28,57	269	1,19	26,67	24,5	1,23
		15	263,5	1,88	36,36	267,8	1,31	16,67	269,2	1,31	10,53	30,0	1,50
		30	264,3	2,44	30,00	268,5	1,75	33,33	270	1,81	38,10	42,4	2,00
		60	265,2	2,87	17,95	269,5	2,38	35,71	271	2,44	34,48	60,0	2,56
		90	265,9	3,25	13,04	270,2	2,81	18,42	271,7	2,87	17,95	73,5	2,98
		120	266,5	3,81	17,31	270,8	3,19	12,33	272,3	3,25	13,04	84,9	3,42
		180	267,4	5,06	32,79	271,6	3,69	15,69	273,3	3,87	19,23	103,9	4,21
		360	269,4	5,06	32,79	273,7	5,00	35,59	275,5	5,25	35,48	147,0	5,10
		1440	275,7	9,00	77,78	280	8,94	78,75	281,9	9,25	76,19	293,9	9,06
		2880	277	9,81	9,03	281,6	9,94	11,19	283,1	10,00	8,11	415,7	9,92
		4320	277,5	10,13	3,18	282,1	10,25	3,14	283,6	10,31	2,13	509,1	10,23
		5760	277,7	10,25	1,23	282,4	10,44	1,83	284	10,56	2,42	587,9	10,42
		7200	278	10,44	1,83	282,6	10,56	1,20	284,2	10,69	1,18	657,3	10,56
		8640	278,1	10,50	0,60	282,8	10,69	1,18	284,4	10,81	1,17	720,0	10,67
		10080	278,3	10,63	1,19	282,9	10,75	0,58	284,5	10,88	0,58	777,7	10,75
		11520	278,4	10,69	0,59	283	10,81	0,58	284,7	11,00	1,15	821,4	10,83
		12960	278,4	10,69	0,00	283,1	10,88	0,58	284,7	11	0,00	881,3	10,85

Tabela AP 29 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.

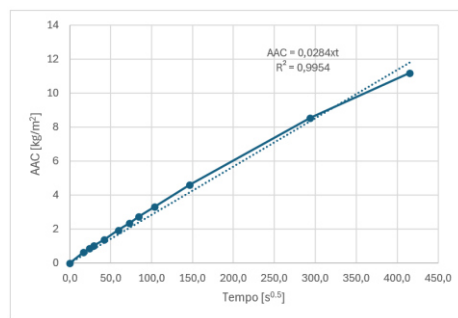
Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade (AAC)														
ID	Idade	Porqom	Provaeto 1			Provaeto 2			Provaeto 3			Tempo	M6 dia	C.C.
Argamassa	[dias]	t-Tempo[m]	M _i -Mazra [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	M _i -Mazra [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	M _i -Mazra [g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [%]	Δt [s]	AAC [%]	U.A. [kg/m ²]
A10AA	56	0	245,2	0	0	227	0	0	245,3	0	0	0,0	0	0,042
		5	246,7	1,13	100	228,4	0,88	100	246,9	1,00	100	17,3	1,00	
		10	247	1,31	16,67	228,7	1,06	21,43	247,2	1,19	18,75	24,5	1,19	
		15	247,3	1,69	28,57	228,9	1,19	11,76	247,5	1,37	15,79	30,0	1,42	
		20	247,9	2,19	29,63	229,5	1,56	31,58	248	1,69	22,73	42,4	1,81	
		60	248,7	2,63	20,00	230,2	2,00	28,00	248,8	2,19	29,63	60,0	2,27	
		90	249,4	2,88	9,52	230,8	2,38	18,75	249,3	2,50	14,29	73,5	2,58	
		120	249,8	3,21	15,22	231,2	2,62	10,53	249,7	2,75	10,00	84,9	2,90	
		180	250,5	4,38	32,08	231,9	3,06	16,67	250,4	3,19	15,91	102,9	3,54	
		360	252,2	4,38	32,08	233,5	4,06	32,65	252	4,19	31,37	147,0	4,21	
		1440	257,1	7,44	70,00	238,5	7,19	76,92	257,3	7,50	79,10	293,9	7,38	
		2880	259,8	9,13	22,69	240,8	8,63	20,00	260,1	9,25	23,33	415,7	9,00	
		4320	260,6	9,63	5,48	241,5	9,06	5,07	261	9,81	6,08	509,1	9,50	
		5760	261,1	9,94	3,25	241,9	9,31	2,76	261,6	10,19	3,82	587,9	9,81	
		7200	261,5	10,19	2,52	242,3	9,56	2,68	261,9	10,38	1,84	657,3	10,04	
		8640	261,8	10,38	1,84	242,5	9,69	1,31	262,2	10,56	1,81	720,0	10,21	
		10080	262	10,5	1,20	242,6	9,75	0,65	262,4	10,69	1,18	777,7	10,31	
		11520	262,2	10,63	1,19	242,7	9,81	0,64	262,5	10,75	0,58	831,4	10,40	
		12960	262,3	10,69	0,59	242,8	9,88	0,64	262,6	10,8125	0,58	881,8	10,46	
A20AA	56	0	236,1	0	0	244,4	0	0	234	0	0	0,0	0	0,027
		5	237,2	0,81	100	245,6	0,75	100	235,4	0,88	100	17,3	0,81	
		10	237,4	0,94	15,38	245,8	0,88	16,67	235,6	1,00	14,29	24,5	0,94	
		15	237,6	1,19	26,67	246	1,00	14,29	235,8	1,13	12,50	30,0	1,10	
		20	238	1,50	26,32	246,4	1,25	25,00	236,2	1,37	22,22	42,4	1,38	
		60	238,5	1,75	16,67	246,9	1,56	25,00	236,8	1,75	27,27	60,0	1,69	
		90	238,9	1,94	10,71	247,3	1,81	16,00	237,2	2,00	14,29	73,5	1,92	
		120	239,2	2,25	16,13	247,6	2,00	10,34	237,6	2,25	12,50	84,9	2,17	
		180	239,7	2,94	30,56	248,1	2,31	15,63	238,1	2,56	13,89	102,9	2,60	
		360	240,3	2,94	30,56	249,1	2,94	27,03	239,3	3,31	29,27	147,0	3,06	
		1440	244,1	5,00	70,21	252,5	5,06	72,34	243,1	5,69	71,70	293,9	5,25	
		2880	246,7	6,63	32,50	255,1	6,69	32,10	245,8	7,38	29,67	415,7	6,90	
		4320	248,3	7,63	15,09	256,7	7,69	14,95	247,5	8,44	14,41	509,1	7,92	
		5760	249,5	8,38	9,84	258	8,50	10,57	248,6	9,13	8,15	587,9	8,67	
		7200	250,5	9	7,46	259	9,13	7,35	249,5	9,69	6,16	657,3	9,27	
		8640	251,3	9,50	5,56	259,9	9,69	6,16	250,1	10,06	3,87	720,0	9,75	
		10080	251,9	9,88	3,95	260,6	10,13	4,52	250,7	10,44	3,73	777,7	10,15	
		11520	252,4	10,19	3,16	261,1	10,44	3,09	251,2	10,75	2,99	831,4	10,46	
		12960	252,9	10,50	3,07	261,6	10,75	2,99	251,6	11	2,33	881,8	10,75	
A50-T	56	0	243,4	0	0	238,9	0	0	243,2	0	0	0,0	0	0,023
		5	244,4	0,75	100	239,1	0,75	100	244,1	0,56	100	17,3	0,69	
		10	244,6	0,81	8,33	239,3	0,875	16,67	244,3	0,69	22,22	24,5	0,79	
		15	244,7	1,00	23,08	239,4	0,94	7,14	244,4	0,75	9,09	30,0	0,90	
		20	245	1,31	31,25	239,8	1,19	26,67	244,7	0,94	25,00	42,4	1,15	
		60	245,5	1,50	14,29	239,3	1,50	26,32	245,1	1,19	26,67	60,0	1,40	
		90	245,8	1,69	12,50	239,7	1,75	16,67	245,4	1,38	15,79	73,5	1,60	
		120	246,1	2,00	18,52	240	1,94	10,71	245,6	1,50	9,09	84,9	1,81	
		180	246,6	2,75	37,50	240,7	2,37	22,50	246	1,75	16,67	102,9	2,29	
		360	247,8	2,75	37,50	242	3,19	34,21	247,1	2,44	39,29	147,0	2,79	
		1440	252,3	5,56	102,27	246,8	6,19	94,12	251,2	5,00	105,13	293,9	5,58	
		2880	255,5	7,56	35,96	250,4	8,44	36,36	254,5	7,06	41,25	415,7	7,69	
		4320	257,5	8,31	16,53	252,4	9,69	14,81	256,5	8,31	17,70	509,1	8,94	
		5760	259,1	9,81	11,35	253,9	10,63	9,68	258,3	9,44	13,53	587,9	9,96	
		7200	260,2	10,5	7,01	254,5	11	3,53	259,6	10,25	8,61	657,3	10,58	
		8640	261	11,00	4,76	254,8	11,19	1,70	260,5	10,81	5,49	720,0	11,00	
		10080	261,5	11,31	2,84	255,1	11,375	1,68	261,3	11,31	4,62	777,7	11,33	
		11520	261,8	11,50	1,66	255,3	11,50	1,10	261,7	11,56	2,21	831,4	11,52	
		12960	262,1	11,69	1,63	255,5	11,63	1,09	261,9	11,6875	1,08	881,8	11,67	
A100-T	56	0	238,2	0	0	245	0	0	232,4	0	0	0,0	0	0,033
		5	239,7	1,13	100	246,6	1,00	100	234	1,00	100	17,3	1,04	
		10	240	1,25	11,11	246,8	1,125	12,50	234,2	1,12	12,50	24,5	1,17	
		15	240,2	1,56	25,00	247,1	1,31	16,67	234,4	1,25	11,11	30,0	1,38	
		20	240,7	1,94	24,00	247,5	1,56	19,05	234,9	1,56	25,00	42,4	1,69	
		60	241,3	2,25	16,13	248,2	2,00	28,00	235,5	1,94	24,00	60,0	2,06	
		90	241,8	2,50	11,11	248,7	2,31	15,63	235,9	2,19	12,90	73,5	2,33	
		120	242,2	2,88	15,00	249,1	2,56	10,81	236,3	2,44	11,43	84,9	2,63	
		180	242,8	3,21	32,61	249,9	3,06	19,51	236,9	2,81	15,38	102,9	3,22	
		360	244,3	3,21	32,61	251,6	4,13	34,69	238,4	3,75	33,33	147,0	3,90	
		1440	249,6	7,13	86,89	257,7	7,94	92,42	243,6	7,00	86,67	293,9	7,35	
		2880	253,3	9,44	32,46	261,6	10,38	30,71	247,3	9,31	33,04	415,7	9,71	
		4320	255,3	10,69	12,25	263,6	11,63	12,05	249,4	10,63	14,09	509,1	10,98	
		5760	256,8	11,63	8,77	264,9	12,44	6,99	250,9	11,56	8,82	587,9	11,88	
		7200	257,5	12,06	3,76	265,4	12,75	2,51	251,5	11,94	3,24	657,3	12,25	
		8640	257,9	12,31	2,07	265,9	12,06	2,45	251,8	12,13	1,57	720,0	12,50	
		10080	258,3	12,56	2,03	266,2	12,25	1,44	252,2	12,38	2,06	777,7	12,73	
		11520	258,6	12,75	1,49	266,5	12,44	1,42	252,4	12,50	1,01	831,4	12,90	
		12960	258,8	12,88	0,98	266,8	12,63	1,40	252,7	12,69	1,50	881,8	13,06	

Tabela AP 30 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade de várias argamassas.

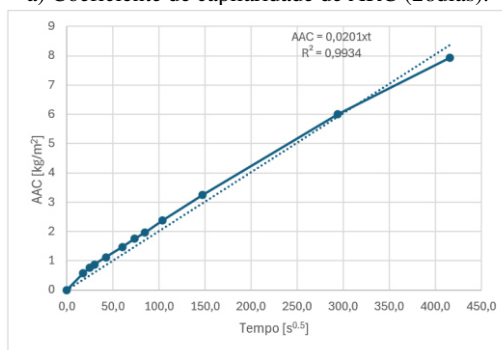
Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade (AAC)														
ID	Idade	Poragem	Prova 1			Prova 2			Prova 3			Tempo	Média	C.C.
Argamassa	[dias]	t-Tempo[m]	M ₁ -Mazza[g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [g]	M ₁ -Mazza[g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [g]	M ₁ -Mazza[g]	AAC [kg/m ²]	ΔMi [g]	t-Tempo[m]	AAC [g]	U.A. [kg/m ²]
A20C-T	56	0	223,2	0	0	225	0	0	225,9	0	0	0,0	0	0,024
		5	224,4	0,94	100	226,1	0,69	100	227	0,69	100	17,3	0,77	
		10	224,7	1,00	6,67	226,2	0,81	18,18	227,1	0,75	9,09	24,5	0,85	
		15	224,8	1,19	18,75	226,5	0,94	15,38	227,3	0,88	16,67	30,0	1,00	
		30	225,1	1,50	26,32	226,8	1,13	20,00	227,6	1,06	21,43	42,4	1,23	
		60	225,6	1,69	12,50	227,2	1,37	22,22	228,1	1,37	29,41	60,0	1,48	
		90	225,9	1,88	11,11	227,5	1,56	12,64	228,4	1,56	13,64	73,5	1,67	
		120	226,2	2,19	16,67	227,8	1,75	12,00	228,7	1,75	12,00	84,9	1,90	
		180	226,7	2,88	31,43	228,2	2,00	14,29	229,2	2,06	17,86	103,9	2,31	
		360	227,8	2,88	31,43	229,3	2,69	34,38	230,3	2,75	33,33	147,0	2,77	
		1440	231,5	5,19	80,43	233	5,00	86,05	234,2	5,19	88,64	293,9	5,13	
		2880	234,4	7,00	34,94	235,9	6,81	36,25	237,2	7,06	36,14	415,7	6,96	
		4320	236,2	8,19	16,96	237,6	7,88	15,60	239,2	8,31	17,70	509,1	8,13	
		5760	237,9	9,19	12,81	239,2	8,87	12,70	240,8	9,31	12,03	587,9	9,13	
		7200	239,1	9,94	8,16	240,3	9,56	7,75	241,9	10,00	7,38	657,3	9,83	
		8640	239,9	10,44	5,03	241,2	10,13	5,88	242,8	10,56	5,63	720,0	10,38	
		10080	240,5	10,81	3,59	241,9	10,56	4,32	243,5	11,00	4,14	777,7	10,79	
		11520	240,9	11,06	2,31	242,4	10,88	2,96	244	11,31	2,84	831,4	11,08	
		12960	241,3	11,31	2,26	242,8	11,13	2,30	244,3	11,5	1,66	881,8	11,31	
A5AA-T	56	0	259	0	0	265,6	0	0	246,5	0	0	0,0	0	0,057
		5	260,7	1,44	100	267,5	1,19	100	248,3	1,13	100	17,3	1,25	
		10	261,2	1,63	13,04	268,1	1,56	31,58	248,7	1,37	22,22	24,5	1,52	
		15	261,6	2,19	34,62	268,6	1,88	20,00	249,2	1,69	22,73	30,0	1,92	
		30	262,5	2,69	22,86	269,7	2,56	36,67	250,1	2,25	33,33	42,4	2,50	
		60	263,3	3,25	20,93	270,9	3,31	29,27	251	2,81	25,00	60,0	3,12	
		90	264,2	3,69	13,46	271,7	3,81	15,09	251,8	3,31	17,78	73,5	3,60	
		120	264,9	4,38	18,64	272,5	4,31	13,11	252,4	3,69	11,32	84,9	4,13	
		180	266	5,87	34,29	273,7	5,06	17,39	253,4	4,31	16,95	103,9	5,08	
		360	268,4	5,87	34,29	276,2	6,62	30,86	255,8	5,81	34,78	147,0	6,10	
		1440	274,5	9,69	64,89	281,6	10,00	50,94	261,4	9,31	60,22	293,9	9,67	
		2880	275,2	10,13	4,52	282,3	10,44	4,37	261,9	9,62	3,36	415,7	10,06	
		4320	275,3	10,19	0,62	282,4	10,50	0,60	262,1	9,75	1,30	509,1	10,15	
		5760	275,8	10,50	3,07	282,9	10,81	2,92	262,5	10,00	2,56	587,9	10,44	
		7200	275,9	10,56	0,60	283	10,88	0,58	262,7	10,13	1,25	657,3	10,52	
		8640	276,1	10,69	1,18	283,2	11,00	1,15	262,8	10,19	0,62	720,0	10,63	
		10080	276,2	10,75	0,58	283,3	11,06	0,57	262,9	10,25	0,61	777,7	10,69	
		11520	276,3	10,81	0,58	283,3	11,06	0,00	263,1	10,38	1,22	831,4	10,75	
		12960	276,4	10,88	0,58	283,5	11,19	1,13	263,2	10,44	0,60	881,8	10,83	
A10AA-T	56	0	219,1	0	0	218,8	0	0	253,4	0	0	0,0	0	0,058
		5	222,2	2,13	100	221,1	1,44	100	255,2	1,12	100	17,3	1,56	
		10	222,5	2,38	11,76	221,5	1,69	17,39	255,5	1,31	16,67	24,5	1,79	
		15	222,9	2,88	21,05	221,8	1,88	11,11	255,8	1,50	14,29	30,0	2,08	
		30	223,7	3,31	15,22	222,4	2,25	20,00	256,6	2,00	33,33	42,4	2,52	
		60	224,4	3,69	11,32	223,2	2,75	22,22	257,3	2,44	21,87	60,0	2,96	
		90	225	3,94	6,78	223,7	3,06	11,36	257,9	2,81	15,38	73,5	3,27	
		120	225,4	4,56	15,87	224,1	3,31	8,16	258,4	3,12	11,11	84,9	3,67	
		180	226,4	5,56	21,92	224,9	3,81	15,09	259,2	3,62	16,00	103,9	4,33	
		360	228	5,56	21,92	226,5	4,81	26,23	261	4,75	21,03	147,0	5,04	
		1440	232,5	8,38	50,56	231,3	7,81	62,34	266,1	7,94	67,11	293,9	8,04	
		2880	233,6	9,06	8,21	233,1	8,94	14,40	269,1	9,81	23,62	415,7	9,27	
		4320	233,8	9,19	1,38	233,6	9,25	3,50	269,9	10,31	5,10	509,1	9,58	
		5760	234,3	9,50	3,40	234,2	9,62	4,05	270,7	10,81	4,85	587,9	9,98	
		7200	234,5	9,63	1,32	234,5	9,81	1,95	271,1	11,06	2,31	657,3	10,17	
		8640	234,7	9,75	1,30	234,7	9,94	1,27	271,5	11,31	2,26	720,0	10,33	
		10080	234,9	9,88	1,28	235	10,13	1,89	271,8	11,50	1,66	777,7	10,50	
		11520	235,1	10,00	1,27	235,1	10,19	0,62	272	11,63	1,09	831,4	10,60	
		12960	235,1	10,00	0,00	235,3	10,31	1,23	272,3	11,81	1,61	881,8	10,71	
A20AA-T	56	0	222	0	0	228,4	0	0	236,6	0	0	0,0	0	0,063
		5	225	1,94	100	230,1	1,06	100	239,2	1,63	100	17,3	1,54	
		10	225,1	2,19	12,90	230,4	1,25	17,65	239,4	1,75	7,69	24,5	1,73	
		15	225,5	2,56	17,14	230,6	1,37	10,00	239,6	1,88	7,14	30,0	1,94	
		30	226,1	2,94	14,63	231,2	1,75	27,27	240,2	2,25	20,00	42,4	2,31	
		60	226,7	3,13	6,28	231,7	2,06	17,86	240,8	2,62	16,67	60,0	2,60	
		90	227	3,31	6,00	232	2,25	9,09	241,2	2,88	9,52	73,5	2,81	
		120	227,3	3,69	11,32	232,3	2,44	8,33	241,5	3,06	6,52	84,9	3,06	
		180	227,9	4,38	18,64	232,7	2,69	10,26	242,1	3,44	12,24	103,9	3,50	
		360	229	4,38	18,64	233,7	3,31	22,26	243,4	4,25	23,64	147,0	3,98	
		1440	232,4	6,50	48,57	236,8	5,25	58,49	246,9	6,44	51,47	293,9	6,06	
		2880	234,6	7,88	21,15	239,1	6,69	27,38	249,2	7,88	22,33	415,7	7,48	
		4320	235,9	8,69	10,32	240,4	7,50	12,15	250,7	8,81	11,90	509,1	8,33	
		5760	237,2	9,50	9,35	241,8	8,38	11,67	252,1	9,69	9,93	587,9	9,19	
		7200	237,9	9,94	4,61	242,6	8,87	5,97	252,8	10,13	4,52	657,3	9,65	
		8640	238,4	10,25	3,14	243,4	9,38	5,62	253,6	10,63	4,94	720,0	10,08	
		10080	239,1	10,69	4,27	244,1	9,81	4,67	254,1	10,94	2,94	777,7	10,48	
		11520	239,5	10,94	2,34	244,7	10,19	3,82	254,6	11,25	2,86	831,4	10,79	
		12960	239,8	11,13	1,71	245,2	10,50	3,07	255,1	11,5625	2,78	881,8	11,06	



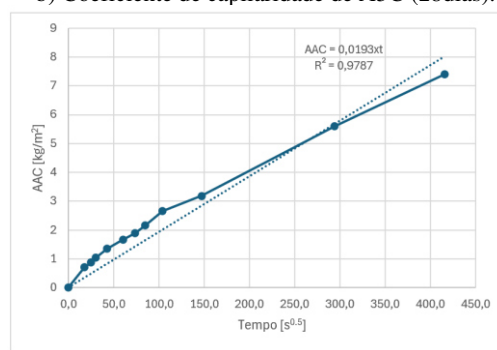
a) Coeficiente de capilaridade de ARC (28dias).



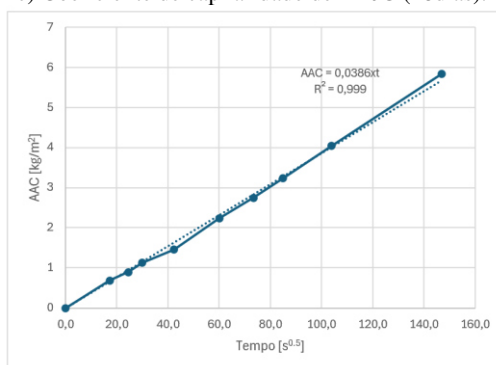
b) Coeficiente de capilaridade de A5C (28dias).



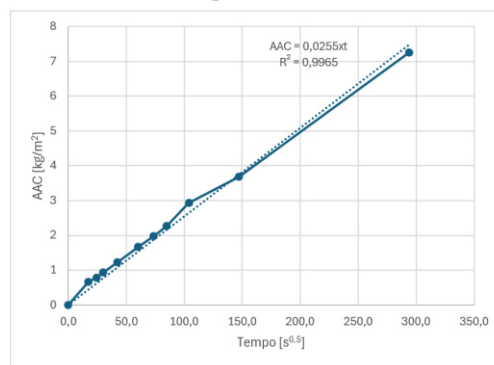
c) Coeficiente de capilaridade de A10C (28dias).



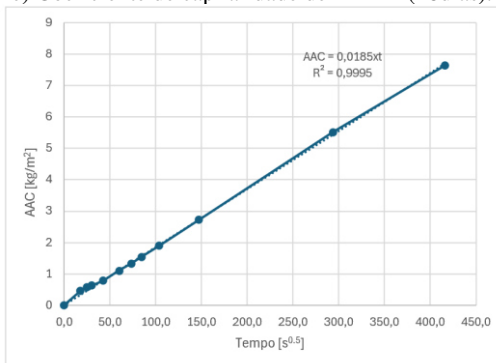
d) Coeficiente de capilaridade de A20C (28dias).



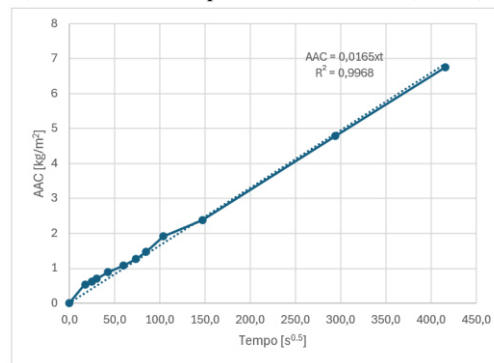
e) Coeficiente de capilaridade de ARAA (28dias).



f) Coeficiente de capilaridade de A5AA (28dias).

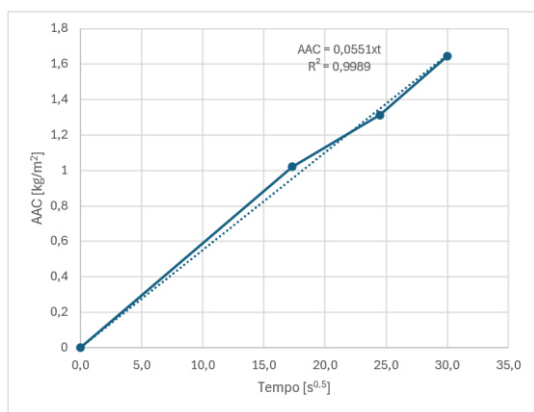


g) Coeficiente de capilaridade de A10AA (28dias).

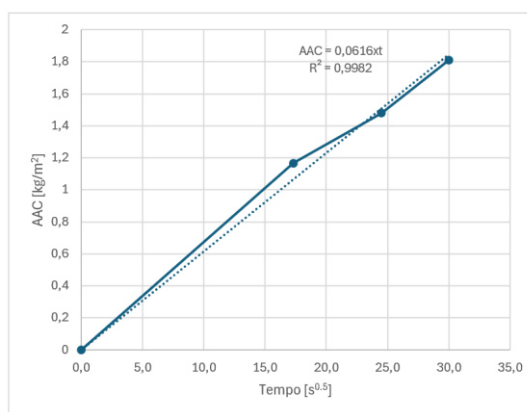


h) Coeficiente de capilaridade de A20AA (28dias).

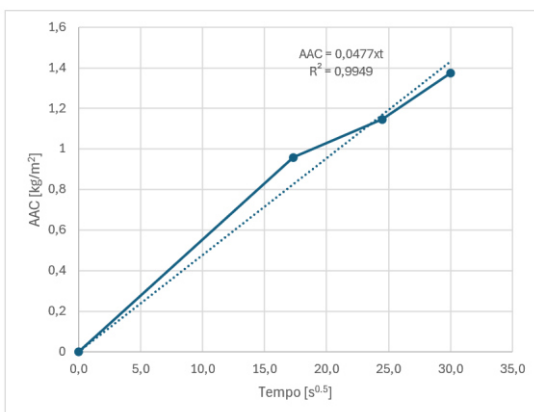
Figura AP 1 - Determinação gráfica do coeficiente de capilaridade de várias argamassas.



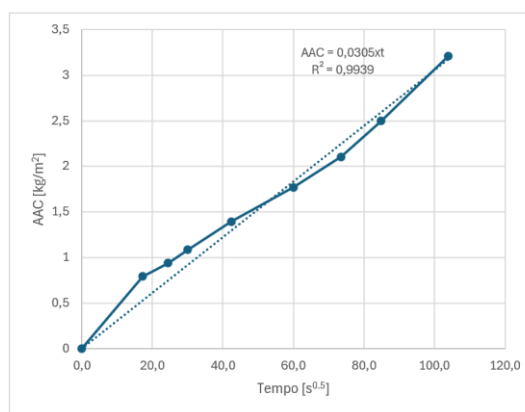
a) Coeficiente de capilaridade de A5C-T (28dias).



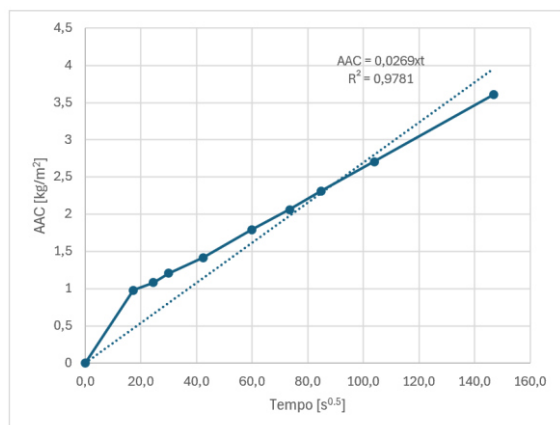
b) Coeficiente de capilaridade de A10C-T (28dias).



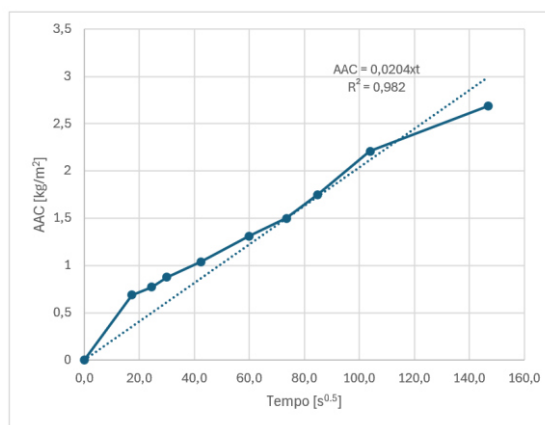
c) Coeficiente de capilaridade de A20C-T (28dias).



d) Coeficiente de capilaridade de A5AA-T (28dias).

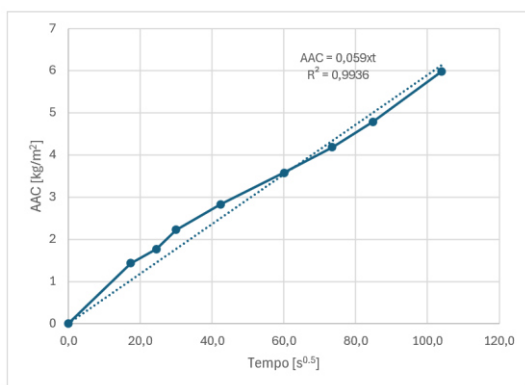


e) Coeficiente de capilaridade de A10AA-T (28dias).

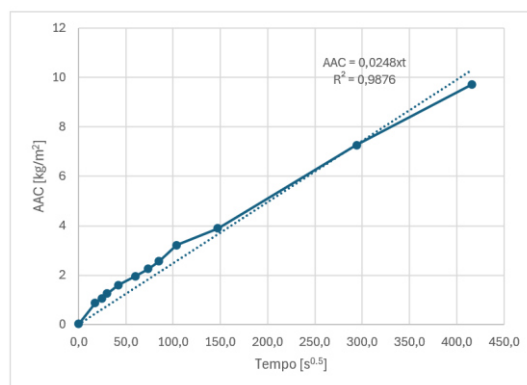


f) Coeficiente de capilaridade de A20AA-T (28dias).

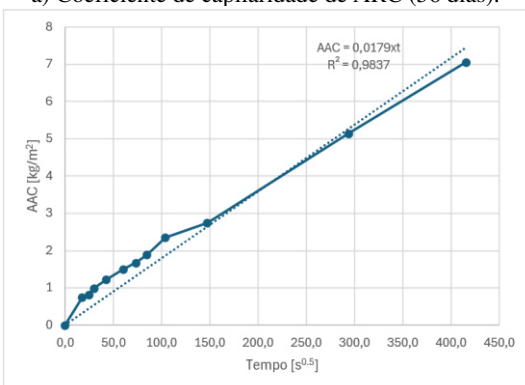
Figura AP 2 - Determinação gráfica do coeficiente de capilaridade de várias argamassas.



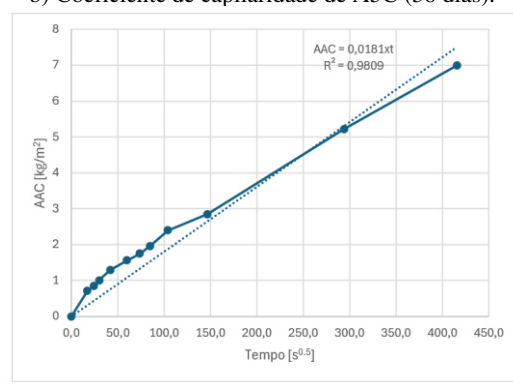
a) Coeficiente de capilaridade de ARC (56 dias).



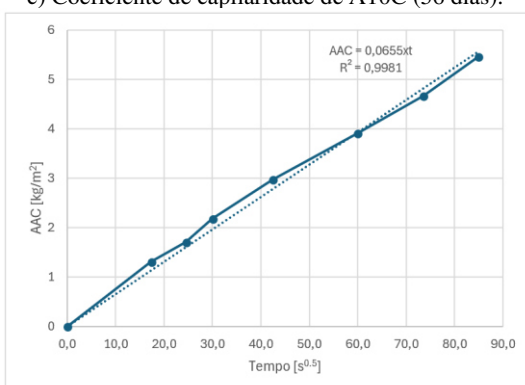
b) Coeficiente de capilaridade de A5C (56 dias).



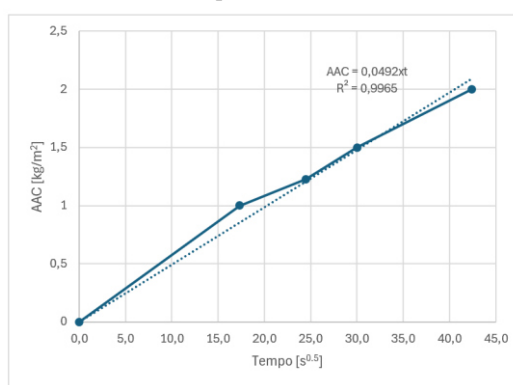
c) Coeficiente de capilaridade de A10C (56 dias).



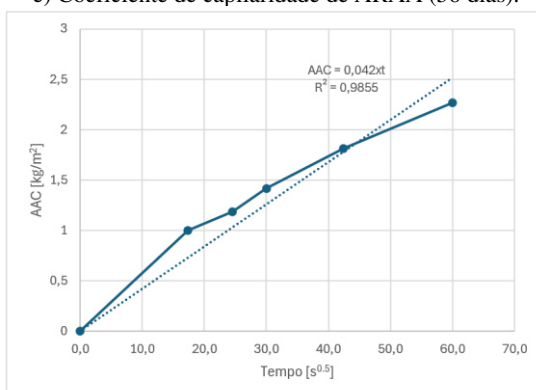
d) Coeficiente de capilaridade de A20C (56 dias).



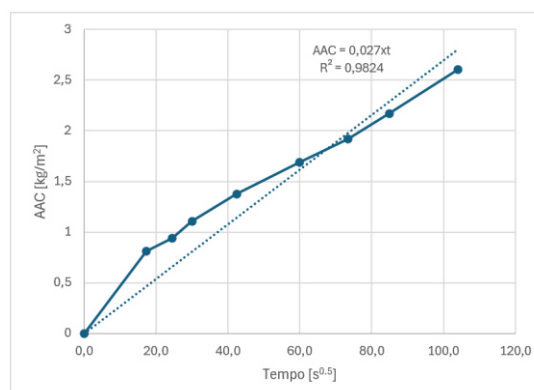
e) Coeficiente de capilaridade de ARAA (56 dias).



f) Coeficiente de capilaridade de A5AA (56 dias).

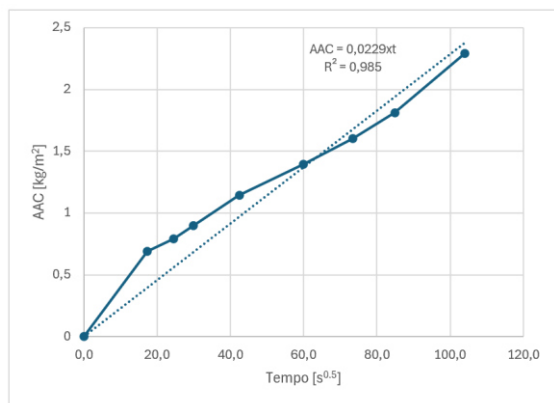


g) Coeficiente de capilaridade de A10AA (56 dias).

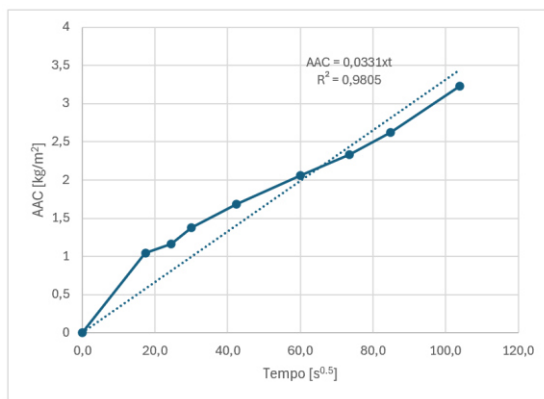


h) Coeficiente de capilaridade de A20AA (56 dias).

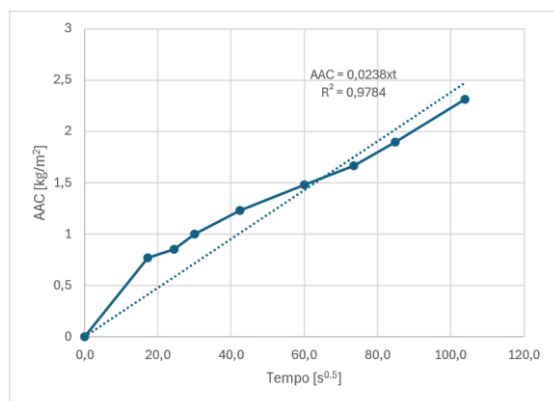
Figura AP 3 - Determinação gráfica do coeficiente de capilaridade de várias argamassas.



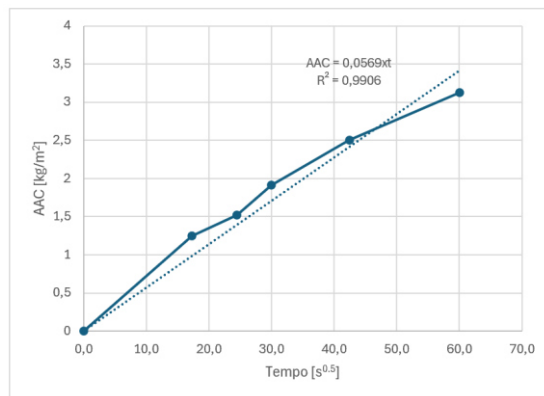
a) Coeficiente de capilaridade de A5C-T (56 dias).



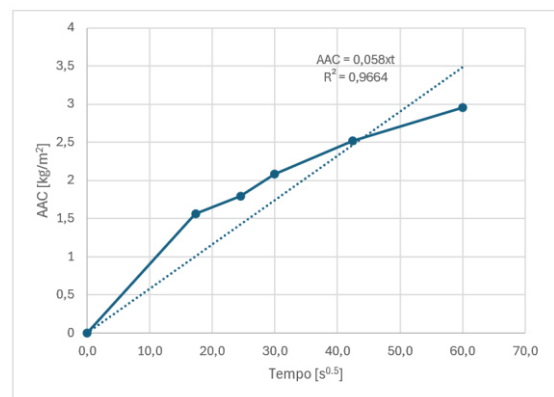
b) Coeficiente de capilaridade de A10C-T (56 dias).



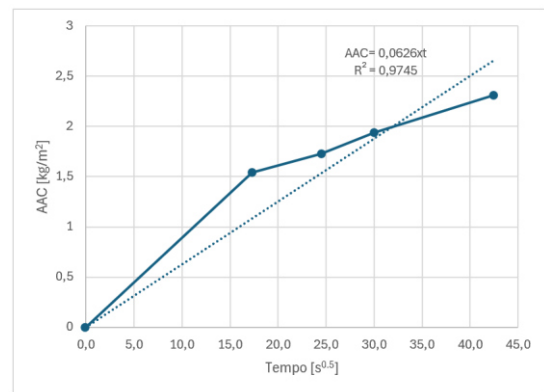
c) Coeficiente de capilaridade de A20C-T (56 dias).



d) Coeficiente de capilaridade de A5AA-T (56 dias).



e) Coeficiente de capilaridade de A10AA-T (56 dias).



f) Coeficiente de capilaridade de A20AA-T (56 dias).

Figura AP 4 - Determinação gráfica do coeficiente de capilaridade de várias argamassas.

C.4 RESULTADO DO ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

Tabela AP 31- Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons a 28 dias.

Resultados do Ensaio da Velocidade de Propagação de Ultrassons								
ID Argamassa	Idade [dias]	Leitura	Provete 1		Provete 2		VPU [km/s]	
			Tempo [μs]	Velocidade [m/s]	Tempo [μs]	Velocidade [m/s]	Média	D.P
ARC	28	1	69,5	2302	70	2286	2,299	0,016
		2	69	2319	70	2286		
		3	69	2319	70	2286		
A5C	28	1	73,0	2192	75,5	2119	2,171	0,030
		2	73	2192	74	2162		
		3	72,8	2198	74	2162		
A10C	28	1	76,8	2083	77	2078	2,070	0,009
		2	77,3	2070	77,5	2065		
		3	77,8	2057	77	2070		
A20C	28	1	83,8	1909	83	1928	1,978	0,135
		2	71	2254	83,3	1921		
		3	83	1928	83,0	1928		
ARAA	28	1	72,8	2198	70,5	2270	2,238	0,041
		2	72,8	2198	70	2286		
		3	72,5	2207	70,5	2270		
A5AA	28	1	74,3	2153	74	2162	2,155	0,014
		2	74,3	2153	75	2133		
		3	73,5	2177	74	2153		
A10AA	28	1	75,8	2111	76	2097	2,110	0,012
		2	75	2133	76	2105		
		3	75,8	2111	76	2105		
A20AA	28	1	80,5	1988	81	1980	1,988	0,005
		2	80,3	1993	80,5	1988		
		3	80,3	1993	80,5	1988		
A5C-T	28	1	74,0	2162	75	2133	2,143	0,025
		2	74	2162	75,5	2119		
		3	73,8	2168	75,8	2111		
A10C-T	28	1	78,5	2038	78,5	2038	2,015	0,019
		2	80	2000	79,5	2013		
		3	80	2000	80	2000		
A20C-T	28	1	84,5	1893	82,5	1939	1,904	0,032
		2	85,3	1876	83	1928		
		3	86	1860	83	1928		
A5AA-T	28	1	73,8	2168	73,5	2177	2,181	0,019
		2	73	2192	73	2207		
		3	74,3	2153	73	2192		
A10AA-T	28	1	75,0	2133	77	2083	2,098	0,028
		2	75,8	2111	78	2062		
		3	75,5	2119	77	2078		
A20AA-T	28	1	83,0	1928	81,5	1963	1,949	0,016
		2	82,5	1939	81,5	1963		
		3	82,5	1939	81,5	1963		

Tabela AP 32 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons a 56 dias.

Resultados do Ensaio da Velocidade de Propagação de Ultrassons								
ID Argamassa	Idade [dias]	Leitura	Provete 1		Provete 2		VPU [km/s]	
			Tempo [μs]	Velocidade [m/s]	Tempo [μs]	Velocidade [m/s]	Média	D.P.
ARC	56	1	69,5	2302	69,5	2302	2,299	0,007
		2	69,5	2302	69,5	2302		
		3	70	2286	69,5	2302		
A5C	56	1	76,5	2092	75,5	2119	2,101	0,021
		2	77	2078	75,5	2119		
		3	77	2078	75,5	2119		
A10C	56	1	77,5	2065	79,3	2018	2,030	0,020
		2	78,3	2043	79,5	2013		
		3	79	2025	79,3	2018		
A20C	56	1	85,5	1871	85,8	1865	1,868	0,008
		2	86	1860	85,0	1882		
		3	86	1860	85,5	1871		
ARAA	56	1	68,8	2326	70	2286	2,301	0,029
		2	69	2319	70,5	2270		
		3	68,5	2336	70,5	2270		
A5AA	56	1	71,5	2238	71,5	2238	2,233	0,032
		2	73	2192	71,5	2238		
		3	72,5	2207	70	2286		
A10AA	56	1	73	2192	75	2133	2,171	0,030
		2	73	2192	75	2148		
		3	72,5	2207	74	2153		
A20AA	56	1	78,2	2046	78,3	2043	2,062	0,015
		2	77	2078	77,5	2065		
		3	77	2078	77,5	2065		
A5C-T	56	1	73,5	2177	76,0	2105	2,135	0,032
		2	74,5	2148	75,8	2111		
		3	74	2162	76,0	2105		
A10C-T	56	1	78,8	2030	78,5	2038	2,041	0,012
		2	78,5	2038	78,5	2038		
		3	78,5	2038	77,5	2065		
A20C-T	56	1	84,5	1893	86	1860	1,882	0,031
		2	83,5	1916	86,0	1860		
		3	83,5	1916	86,8	1843		
A5AA-T	56	1	70,5	2270	71,5	2238	2,242	0,014
		2	71,5	2238	71,7	2232		
		3	71,5	2238	71,5	2238		
A10AA-T	56	1	73,5	2177	74	2162	2,161	0,011
		2	74,5	2148	74	2162		
		3	74,5	2148	74	2168		
A20AA-T	56	1	80,5	1988	78,8	2030	2,019	0,023
		2	80	2000	78,0	2051		
		3	79,5	2013	78,8	2030		

ANEXOS

- Anexo A – Deliberação 23/123 da ESTBarreiro
- Anexo B – Declaração de Desempenho 0856-CPR-0402
- Anexo C – Ficha Técnica de Produto (Areia 0/2)
- Anexo D – Ficha Técnica de Produto (Areia 0/4)



DELIBERAÇÃO 23/123 DA ESTBARREIRO



DELIBERAÇÃO 23/123

PROPOSTA DE PLANO DE DISSERTAÇÃO/TRABALHO DE PROJETO/ESTÁGIO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DO(A) ESTUDANTE Nº 200802028

O Conselho Técnico-Científico, da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal (ESTBarreiro/IPS), decidiu aprovar a proposta de plano de dissertação convencional do(a) estudante Ivo Jorge Magalhães da Costa, nº 200802028, com o título "Argamassas activadas alcalinamente com borracha de pneus usados", sob orientação do Professor Doutor António Pedro Carones Duarte e co-orientação do Professor Doutor Miguel Nuno Caneiras Bravo, no âmbito do Curso de Mestrado em Engenharia Civil (MEC).

Barreiro, 06 de dezembro de 2023

O Presidente do Conselho Técnico-Científico

Deliberação 23/123
Assinado por: NELSON JORGE
GAUDÊNCIO CARRIÇO
Num. de identificação: 10719842

(Prof. Nelson Carriço)

Deliberação 23/123

1/1

Figura AN 1 - Deliberação 23/123 da ESTBarreiro.

B

DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

0856-CPR-0402



Declaração de Desempenho 0856-CPR-0402

- Código de identificação único do produto-tipo:
Cinza volante para betão
categoria de finura: N, valor declarado de finura: 16%, categoria de Perda ao fogo: B
densidade das partículas: 2300 kg/m³
- Número do tipo, do lote ou da série, ou quaisquer outros elementos que permitam a identificação do produto de construção, nos termos do nº 4 do artigo 11º do RPC:
Ver 1.
- Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada aplicável, tal como previsto pelo fabricante:
Fabrico de betão, argamassa e caldas
- Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante:
EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A.
Centro de Produção de Sines
Apartado 46, S. Torpes
7520-089 Sines
- Se aplicável, nome e endereço de contacto do mandatário cujo mandato abrange os actos especificados no nº 2 do artigo 12º do RPC:
Não aplicável
- Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção:
Sistema 1+
- Produto de construção com declaração de desempenho abrangida por uma norma harmonizada:
O LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, organismo de certificação de produto notificado nº 0856, realizou a determinação do produto-tipo com base nos ensaios de tipo (incluindo amostragem), a inspeção inicial da unidade fabril e do controlo da produção em fábrica, o acompanhamento, apreciação e avaliação do controlo da produção em fábrica e os ensaios aleatórios de amostras colhidas antes da colocação do produto no mercado, no âmbito do sistema 1+ e emitiu o certificado de regularidade de desempenho.

8. Desempenho declarado

Características	Desempenho	Especificações Técnicas Harmonizadas
Perda ao Fogo	Categoria B	≤ 7%
Finura	Categoria N, 16%	≤ 40% e VD ± 10%
Óxido Cálcio Livre	< 1,6%	< 1,6%
Óxido Cálcio Total	< 10%	< 10%
Cloretos	≤ 0,10%	≤ 0,10%
Sulfatos	≤ 3%	≤ 3%
Massa Volumica	2300 kg/m ³	± 200 kg/m ³ do VD
Índice de Actividade:		
28 dias	≥ 75%	≥ 75%
90 dias	≥ 85%	≥ 85%
Expansibilidade (se CaO livre > 1,5%)	< 10 mm	< 10 mm

- O desempenho do produto identificado nos pontos 1 e 2 é conforme com o desempenho declarado no ponto 8. A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 4.

Sines, 21 de Novembro de 2014

Engº João Amaral
Director do Centro de Produção Sines

Revisão: B

Figura AN 2 - Declaração de Desempenho das cinzas volantes.



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO (AREIA 0/2)



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto: Areia Lavada 0/2 Mesquita Origem: Herdade da Mesquita - Sesimbra
Aplicação: Betão (EN 12620:2002+A1) e Misturas betuminosas (NP EN 13043)
Tipo: Quartzo, quartzito, feldspato (partículas subangulosas a subarredondadas)

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
31,5	100		
25	100		
20	100		
16	100		
12,5	100		
10	100		
8	100		
6,3	100		
4	100	100	100
2	100	95	100
1	99	79	100
0,5	73		
0,25	16	0	41
0,125	1		
0,063	0,1	0,0	3,0

¹⁾ Valores em percentagem de passados

Controlo da produção

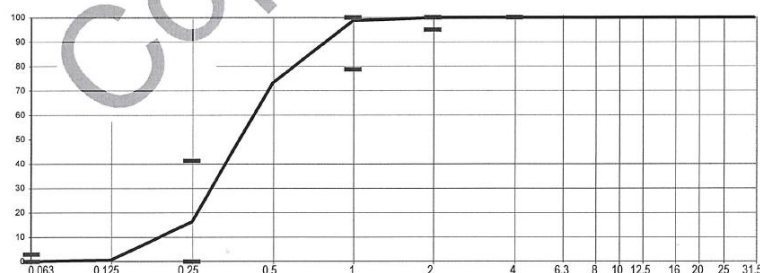
Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	2,10	1,60	2,60
CF	2,33	1,83	2,83

Outras características

Característica	EN 12620:2002+A1	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	0/2	
Granulometria	G _r 85	G _r 85-G _{rc} 20
Massa Volumica:		
-- Material impermeável	2,64 Mg/m ³	
-- Partículas secas em estufa	2,62 Mg/m ³	
-- Partículas saturadas	2,63 Mg/m ³	
Absorção de água	0,3%	
Teor de finos	f ₃	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,8}	
Enxofre total	0,01%	
Teor de Humus	Mais claro	
Teor de cont. orgânicos leves	< 0,1 %	
Retração por secagem	0,017%	
Teor de carbonato de cálcio	0,09%	
Resistência gelo/degelo	DND	
Reactividade álcalis-silica	0,08%	
Resistência choque térmico		DND

NA-Não aplicável

DND- Desempenho não determinado



Data: 02 / 01 / 2010

O Director Produção:

Documento Controlado

F 06.01 - 16/09/2005

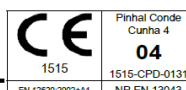
Figura AN 3 - Ficha técnica da areia lavada 0/2, emitida pelo "Grupo SOARVAMIL".

D

FICHA TÉCNICA DE PRODUTO (AREIA 0/4)



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO



Produto: Areia Lavada 0/4 - P. Conde Cunha 4 Origem: Pinhal Conde Cunha 4 - Seixal

Aplicação: Betão (EN 12620:2002+A1) e Misturas betuminosas (NP EN 13043)

Tipo: Quartzo, quartzito, feldspato, moscovite (partículas subangulosas a subarredondadas)

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
31,5	100		
25	100		
20	100		
16	100		
12,5	100		
10	100		
8	100	100	100
6,3	100	98	100
4	97	92	99
2	84	64	99
1	50	30	70
0,5	12		
0,25	3	0	23
0,125	1		
0,063	0,7	0,0	3,0

¹⁾ Valores em percentagem de passados

Controlo da produção

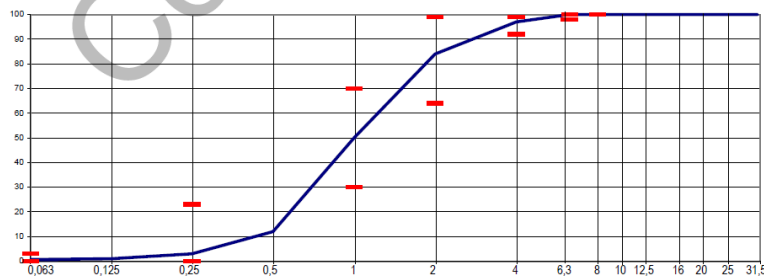
Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,52	3,02	4,02
CF	3,83	3,33	4,33

Outras características

Característica	EN 12620:2002+A1	NP EN 13043
Dimensão nominal (d/D)	0/4	
Granulometria	G ₈₅	G _{A90} -G _{TC20}
Massa Volumica:		
-- Material impermeável	2,63 Mg/m ³	
-- Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m ³	
-- Partículas saturadas	2,62 Mg/m ³	
Absorção de água	0,3%	
Teor de finos	f ₂	NA
Qualidade dos finos	NA	
Teor de cloretos	≤ 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,8}	
Enxofre total	0,04%	
Teor de Humus	Mais claro	
Teor de cont. orgânicos leves	< 0,1%	
Teor de carbonato de cálcio	0,07%	
Retração por secagem	0,018%	
Resistência gelo/degelo	DND	
Reactividade álcalis-silica	0,07%	
Resistência choque térmico		DND

NA- Não aplicável

DND-Desempenho não determinado



Data: 04-01-2010

O Director Produção:

Documento Controlado

F 06.01 - 16/09/2005

Figura AN 4 - Ficha técnica da areia lavada 0/4, emitida pelo "Grupo SOARVAMIL".