



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Rafael Travincas Pinto

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS SUPORTES NO
DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS APLICADAS**

Tese no âmbito do Doutoramento em Engenharia Civil, Construções orientada pelas Professoras Doutoradas Maria Isabel Morais Torres e Inês dos Santos Flores Barbosa Colen e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Dezembro de 2022

Faculdade de Ciência e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

Análise da influência dos suportes no desempenho das argamassas aplicadas

Rafael Travincas Pinto

Tese de Doutoramento na área científica de Construções orientada pela Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres (Universidade de Coimbra) e pela Professora Doutora Inês dos Santos Flores Barbosa Colen (Instituto Superior Técnico) e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Dezembro de 2022



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Agradecimentos

A Deus.

No decorrer desta jornada obtive muito apoio e incentivo que se manifestaram de diversas maneiras e sem eles não seria possível concluir este ciclo. A todas essas entidades e pessoas, meu sincero muito obrigado. No entanto, agradeço, em especial, a algumas pessoas:

Aos meus Pais por tudo que fizeram por mim, pelo grande incentivo aos estudos e por nunca deixarem de acreditar.

À minha noiva Mariana pela motivação, inspiração, dedicação e paciência. Sempre se fazendo presente em todos os momentos.

Às minhas orientadoras Professoras Isabel Torres e Inês Flores-Colen por todo o auxílio, disponibilidade, incentivo e pelo conhecimento transmitido ao longo deste processo.

Ao Professor Manuel Francisco pelo auxílio na campanha experimental, na interpretação dos resultados da análise microestrutural e por todo conhecimento e sabedoria compartilhados.

À professora Maria Paula por todo conhecimento compartilhado sobre algoritmos de aprendizagem de máquina e pela disponibilidade para debater o tema.

À Dora e Poliana pela amizade, companheirismo, ajuda e pelas experiências e conhecimentos partilhados.

Aos amigos Fábio, Alex, André e Kátia por todo apoio e amizade.

Aos colegas do padel pelos momentos de descontração.

Ao Colégio Pedro II, na figura do Magnífico Reitor Oscar Halac, por tornar possível a realização deste trabalho.

Ao Itecons (Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade) pelo apoio, disponibilizando laboratórios, equipamentos e equipa que possibilitaram o desenvolvimento do trabalho experimental.

Ao CERIS e CERENA do DECivil, Instituto Superior Técnico pela oportunidade de desenvolver o trabalho experimental nos laboratórios de construção (LC) e de mineralogia e petrologia (LAMPISST).

Ao projeto IF MORTAR (POCI-01-0145-FEDER-032223/ PTDC/ECI-EGC/32223/2017), no âmbito do programa Portugal 2020, financiado pela FEDER através de o programa POCI e ao Itecons pela cedência das suas instalações e material para a realização da campanha experimental assim como todo o pessoal envolvido.

À FCT pelo financiamento da bolsa de investigação UIDB/04625/2020 realizada no CERIS.

Minha gratidão a todos que sempre estiveram ao meu lado.

Resumo

O objetivo do presente trabalho foi analisar a influência dos substratos no desempenho da argamassa industrializada aplicada, evidenciando as diferenças entre as características da argamassa industrializada endurecida em provetes laboratoriais normalizados e endurecida em substratos reais, e prever, por meio de algoritmos de aprendizagem de máquinas, quais as características do substrato poderiam otimizar as características desta argamassa. O problema central, objeto de análise deste trabalho, consistiu em avaliar como diferentes substratos influenciam as características físicas e mecânicas da argamassa quando aplicadas sobre esses substratos. A metodologia da investigação consistiu na realização de diversas campanhas experimentais, que se iniciaram com a caracterização da argamassa industrializada e dos substratos. Paralelamente as argamassas foram aplicadas e após o endurecimento foram destacadas e caracterizadas por meio dos mesmos ensaios, com adaptações necessárias devido às dimensões da argamassa após o destacamento. A microestrutura da interface formada entre a argamassa e o substrato também foi analisada, com técnicas avançadas de caracterização. A relevância do estudo está em propiciar a possibilidade de proceder a escolhas de revestimento mais adequadas ao tipo de substrato, objetivando a compatibilidade e o desempenho, e em contribuir para o desenvolvimento do conhecimento científico e técnico acerca do desempenho das argamassas aplicadas. Como resultado, pode dizer-se que a argamassa aplicada sobre substratos tem a massa volúmica, a resistência à compressão e a permeabilidade ao vapor de água aumentadas, enquanto ocorre uma redução da porosidade aberta quando comparada com a argamassa endurecida em molde normalizado. Como conclusão, confirma-se a influência de diferentes substratos nas características da argamassa aplicada. Apesar da argamassa ser de uso geral e adequada para diferentes tipos de substratos, os substratos cerâmicos, de betão e de betão leve influenciam de forma diferente as propriedades da argamassa aplicada. A característica mais importante dos substratos cerâmicos que mais influencia o comportamento da argamassa é a absorção de água por capilaridade e dos substratos de betão é a porosidade aberta. Com os algoritmos de aprendizagem de máquina foi possível perceber que a placa de betão é o substrato mais adequado para a argamassa em estudo.

Palavras-chave: Desempenho, substratos, argamassa industrial, algoritmo de aprendizagem de máquina.

Abstract

The objective of the present work was to analyze the influence of the substrates on the performance of the applied industrialized mortar, showing the differences between the characteristics of the industrialized mortar hardened in normalized laboratory specimens and hardened in real substrates, and to predict, through machine learning algorithms, which characteristics of the substrate could optimize the characteristics of this mortar. The central problem, the object of analysis in this work, consisted of evaluating how different substrates influence the physical and mechanical characteristics of the mortar when applied to these substrates. The research methodology carried out several experimental campaigns, which began with the characterization of industrialized mortar and substrates. At the same time, the mortars were applied. After hardening, they were detached and characterized through the same tests, with necessary adaptations due to the dimensions of the mortar after detachment. The microstructure of the interface formed between the mortar and the substrate was also analyzed using advanced characterization techniques. The relevance of the study lies in providing the possibility of choosing the most suitable coating for the type of support, aiming at compatibility and performance, and contributing to the development of scientific and technical knowledge about the performance of the applied mortars. As a result, it can be said that the mortar applied on substrates has increased density, compressive strength, and water vapor permeability. At the same time, there is a reduction in open porosity when compared to mortar hardened in a standard mold. In conclusion, the influence of different substrates on the characteristics of the applied mortar is confirmed. Although mortar is general-purpose and suitable for different types of substrates, ceramic, concrete, and lightweight concrete substrates influence the properties of the applied mortar differently. The most important characteristic of ceramic substrates that most influences the behavior of the mortar is the absorption of water by capillarity, and of concrete substrates is the open porosity. With the machine learning algorithms, it was possible to realize that the concrete slab is the most suitable substrate for the mortar under study.

Keywords: Performance, substrate, industrial mortar, machine learning algorithm.

Índice geral

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Índice geral.....	vii
Índice de figuras	x
Índice de tabelas	xiv
Lista de abreviaturas, sigla e símbolos	xvii
1. Introdução	21
1.1. Enquadramento	21
1.2. Objetivos.....	22
1.3. Metodologia.....	23
1.4. Estrutura e organização	24
2. Estado da arte	27
2.1. Argamassas de revestimento	27
2.2. Argamassas industrializadas.....	33
2.3. Caracterização das argamassas	38
2.4. Caracterização microestrutural	42
2.5. Interface argamassa e substrato	47
2.6. Influência do substrato nas características da argamassa aplicada.....	50
2.7. Algoritmos de aprendizagem de máquina aplicados ao estudo de argamassas.....	55
2.8. Síntese do capítulo.....	63
3. Metodologia e procedimentos de ensaio	67
3.1. Introdução	67
3.2. Fases de caracterização	73
3.2.1. Fase 1 – Caracterização dos substratos.....	73

3.2.2.	Fase 2 - Caracterização da argamassa no estado fresco e da argamassa endurecida no molde normalizado.....	73
3.2.3.	Fases 3, 4 e 5 - Caracterização da argamassa endurecida e destacada dos substratos.....	75
3.2.4.	Fase 6 - Análise dos dados obtidos	78
3.2.5.	Fase 7 - Algoritmos de aprendizagem de máquina	79
3.2.6.	Campanhas experimentais preliminares.....	82
3.3.	Procedimentos de ensaio.....	83
3.3.1.	Consistência por espalhamento da argamassa no estado fresco	83
3.3.2.	Massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco.....	84
3.3.3.	Massa volúmica aparente e porosidade aberta	85
3.3.4.	Coefficiente de absorção de água por capilaridade	85
3.3.5.	Permeabilidade ao vapor de água.....	88
3.3.6.	Índice de secagem	90
3.3.7.	Módulo de elasticidade dinâmico	92
3.3.8.	Resistência à tração por flexão e à compressão	93
3.3.9.	Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	95
3.3.10.	Resistência adesiva	96
3.3.11.	Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas (PUNDIT)	97
3.3.12.	Absorção de água sob baixa pressão (Tubos de Karsten).....	98
3.3.13.	Microromografia de Raios-X (μ CT).....	99
3.3.14.	Microscópio eletrónico de varrimento	101
3.4.	Síntese do capítulo.....	101
4.	Apresentação dos resultados	105
4.1.	Campanhas experimentais preliminares	106
4.1.1.	Análise da influência da rede de fibra de vidro na interface.....	106
4.1.2.	Influência do substrato na argamassa aplicada	107
4.2.	Caracterização dos substratos	108
4.2.1.	Massa volúmica aparente e porosidade aberta	109
4.2.2.	Absorção de água por capilaridade	109
4.2.3.	Permeabilidade ao vapor de água.....	110
4.2.4.	Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	110
4.2.5.	Superfície de contacto	112
4.3.	Caracterização das argamassas	114
4.3.1.	Argamassa no estado fresco	114
4.3.2.	Argamassa endurecida após 28 dias de cura	114

4.3.3. Argamassas destacadas dos substratos após envelhecimento acelerado e cura exterior	133
4.4. Síntese do capítulo	142
5. Análise e discussão dos resultados	147
5.1. Substratos	147
5.2. Argamassa endurecida no molde e argamassas aplicadas e destacadas dos substratos aos 28 dias	156
5.3. Argamassas endurecidas nos substratos com cura normal (28 dias), envelhecimento acelerado e cura no exterior	175
5.4. Síntese do capítulo	191
6. Algoritmos de aprendizagem de máquina.....	195
6.1. Algoritmos no modo de classificação	197
6.2. Algoritmos no modo de regressão	201
6.2.1. Porosidade aberta do substrato	203
6.2.2. Coeficiente de absorção de água por capilaridade do substrato	205
6.2.3. Massa volúmica do substrato.....	206
6.2.4. Permeabilidade ao vapor de água do substrato.....	208
6.2.5. Previsão das características do substrato com base nos atributos da argamassa	210
6.3. Síntese do capítulo	212
7. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	217
7.1. Enquadramento	217
7.2. Conclusão geral e específicas	218
7.3. Proposta para trabalhos futuros	222
Referências	223
Anexos.....	A-3

Índice de figuras

Figura 2.1 Principais algoritmos de aprendizagem de supervisonada	57
Figura 2.2 Fluxo de construção de algoritmos de aprendizagem de máquina (adaptado de Thai, 2021)	58
Figura 2.3 Estrutura do modelo de rede neural artificial	62
Figura 3.1 Fases de desenvolvimento do trabalho	68
Figura 3.2 Substratos utilizados - (A) Bloco de betão leve; (B) Tijolo cerâmico furado; (C) Tijolo cerâmico maciço; (D) Bloco de betão; (E) Placa de betão.....	69
Figura 3.3 Esquema de compatibilização dos provetes	70
Figura 3.4 Malha de fibra de vidro - (A) Abertura da malha; (B) Posicionamento da malha na interface.....	71
Figura 3.5 Preparação da argamassa (molde normalizado) - (A) Acabamento da superfície; (B) Molde finalizado	74
Figura 3.6 Provetes circulares - compactação manual	74
Figura 3.7 Preparação da argamassa	75
Figura 3.8 Aplicação da argamassa no substrato - (A) Aplicação da argamassa; (B) Acabamento da superfície; (C) Proвете finalizado	76
Figura 3.9 Provetes com as dimensões marcadas, quadrados (40 x 40 mm) e circulares (diâmetro de 10 cm).....	76
Figura 3.10 Condições de cura. (A) Local de armazenamento coberto, (B) Local de acondicionamento dos provetes no exterior. (C) Câmara para envelhecimento acelerado	78
Figura 3.11 Ensaio de consistência por espalhamento.....	84
Figura 3.12 Ensaio de absorção de água por capilaridade (esq. - argamassa; dir. - substratos)	86
Figura 3.13 Ensaio de permeabilidade ao vapor de água.....	88
Figura 3.14 Ensaio de índice de secagem	91
Figura 3.15 Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.....	93
Figura 3.16 Ensaio de resistência a tração por flexão (esq.) e à compressão (dir.)	94
Figura 3.17 Ensaio de porosimetria	95
Figura 3.18 Ensaio de resistência adesiva.....	96
Figura 3.19 Ensaio de ultrassom, (esq.) execução do ensaio no provete prismático; (dir.) conjunto argamassa/substrato com os pontos de leitura marcados	98
Figura 3.20 Ensaio de permeabilidade à água sob pressão (esq: início do ensaio; dir: ensaio em execução)	99
Figura 3.21 Ensaio de microtomografia de raios-X.....	100
Figura 3.22 Amostras utilizadas no ensaio. (A)Argamassa endurecida no molde; (B)Argamassa/Bloco de betão; (C)Argamassa/Bloco de betão leve; (D)Argamassa/Placa de	

betão; (E)Argamassa/tijolo maciço; (F)Argamassa/Tijolo furado (diâmetro equivalente: 8-9 mm).....	100
Figura 3.23 Microscópio eletrônico de varrimento de mesa Phenom Pro	101
Figura 4.1 Distribuição dos poros dos substratos	111
Figura 4.2 Bloco de betão leve - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm).112	
Figura 4.3 Bloco de betão - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm)	112
Figura 4.4 Placa de betão - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm)	113
Figura 4.5 Tijolo cerâmico maciço - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm)	113
Figura 4.6 Tijolo cerâmico furado - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm)	113
Figura 4.7 Distribuição dos poros das argamassas aos 28 dias	120
Figura 4.8 Argamassa endurecida no molde: Fotografia (esq.); Lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1 mm)	121
Figura 4.9 Argamassa endurecida no molde – MEV (Ampliação: 380x)	121
Figura 4.10 Argamassa endurecida no molde - microtomografia de raios-X (distância entre círculos amarelos: 1mm)	122
Figura 4.11 Argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ATF) - (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm).....	123
Figura 4.12 Microtomografia de raios-X da argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (distância entre círculos amarelo: 1mm)	123
Figura 4.13 MEV - argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ampliação 380x).....	124
Figura 4.14 MEV - argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ampliação 380x – dir; 360x – esq.)	124
Figura 4.15 Argamassa aplicada no tijolo cerâmico maciço - (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm).....	125
Figura 4.16 Microtomografia de raios-X argamassa aplicada no substrato tijolo cerâmico maciço (distância entre círculos amarelo: 1mm).....	125
Figura 4.17 MEV - argamassa aplicada no tijolo cerâmico maciço (ampliação 380x).....	126
Figura 4.18 Argamassa aplicada na placa de betão - (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm).....	127
Figura 4.19 Microtomografia de raios-X argamassa aplicada na placa de betão (distância entre círculos amarelo: 1mm).....	127
Figura 4.20 MEV - argamassa aplicada na placa de betão (ampliação 380x).....	128
Figura 4.21 Argamassa aplicada ao bloco de betão – (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm).....	129
Figura 4.22 Microtomografia de raios-X argamassa aplicada no substrato bloco de betão (distância entre círculos amarelo: 1mm)	129
Figura 4.23 MEV - argamassa aplicada no substrato bloco de betão (ampliação: 380x).....	130

Figura 4.24 Argamassa aplicada na placa de betão leve - (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm)	131
Figura 4.25 Microtomografia de raios-X argamassa aplicada no substrato bloco de betão leve (distância entre círculos amarelo: 1mm)	131
Figura 4.26 MEV - argamassa aplicada ao substrato bloco de betão leve (ampliação 380x)	132
Figura 4.27 MEV - argamassa aplicada ao substrato bloco de betão leve (ampliação 1000x)	132
Figura 4.28 Distribuição dos poros - argamassas sujeitas a envelhecimento acelerado).....	139
Figura 4.29 Distribuição dos poros - argamassas sujeitas à cura exterior (300 dias)	140
Figura 5.1 Massa volúmica e porosidade aberta dos substratos (valores médios).....	148
Figura 5.2 Coeficiente de absorção de água dos substratos (valores médios)	149
Figura 5.3 Curvas de absorção de água por capilaridade dos substratos	150
Figura 5.4 Permeabilidade ao vapor de água dos substratos (valores médios).....	151
Figura 5.5 Substratos - distribuição dos poros (TF e TM).....	152
Figura 5.6 Substratos - distribuição dos poros (PB, BB e BBL)	153
Figura 5.7 Comparação massa volúmica (argamassas 28 dias de cura)	157
Figura 5.8 MC (esq.); ABB (centro); ATF (dir.). (Barra amarela: 1 cm)	159
Figura 5.9 Porosimetria por intrusão de mercúrio (MC; ATF; ATM).....	160
Figura 5.10 Porosimetria por intrusão de mercúrio (MC; ABB; APB; ABBL)	161
Figura 5.11 Comparação coeficiente de absorção por capilaridade (argamassas 28 dias de cura)	163
Figura 5.12 Comparação Índice de secagem (argamassas 28 dias de cura)	164
Figura 5.13 Comparação resistência à compressão (argamassas 28 dias de cura)	166
Figura 5.14 Massa volúmica x porosidade aberta (argamassas 28 dias de cura).....	172
Figura 5.15 Comparação da massa volúmica (argamassas diferentes tipos de curas).....	176
Figura 5.16 Comparação porosidade aberta (argamassas diferentes tipos de curas)	177
Figura 5.17 Porosimetria por intrusão de mercúrio (ATF; ATF EA; ATF CE; MC).....	178
Figura 5.18 Porosimetria por intrusão de mercúrio (ATM; ATM EA; ATM CE; MC).....	179
Figura 5.19 Porosimetria por intrusão de mercúrio (ABBL; ABBL EA; ABBL CE; MC)...	179
Figura 5.20 Porosimetria por intrusão de mercúrio (ABB; ABB EA; ABB CE; MC).....	180
Figura 5.21 Porosimetria por intrusão de mercúrio (APB; APB EA; APB CE; MC)	180
Figura 5.22 Comparação coeficiente de absorção por capilaridade (argamassas diferentes tipos de curas)	181
Figura 5.23 Comparação permeabilidade ao vapor de água (argamassas diferentes tipos de curas).....	182
Figura 5.24 Comparação índice de secagem (argamassas diferentes tipos de curas).....	183
Figura 5.25 Comparação resistência à compressão (argamassas diferentes tipos de curas)..	184
Figura 5.26 Comparação módulo de elasticidade - ultrassom (argamassas diferentes tipos de curas).....	185

Figura 6.1 Resumo do trabalho realizado	195
Figura 6.2 Esquema de criação do modelo de classificação no <i>Orange</i>	197
Figura 6.3 Esquema de criação do modelo de regressão no <i>Orange</i>	202
Figura 6.4 Porosidade aberta do substrato (valores preditos x valores reais) – ANN (Imagem retirada do <i>software Orange</i>)	204
Figura 6.5 Coeficiente de absorção de água por capilaridade do substrato (valores preditos x valores reais) – ANN (Imagem retirada do <i>software Orange</i>)	206
Figura 6.6 Massa volúmica do substrato (valores preditos x valores reais) – <i>RF</i> (Imagem retirada do <i>software Orange</i>).....	207
Figura 6.7 Permeabilidade ao vapor de água do substrato (valores preditos x valores reais) – <i>SVM</i> (Imagem retirada do <i>software Orange</i>)	209

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Classificação das propriedades da argamassa endurecida	34
Tabela 2.2 Requisitos para as propriedades do produto endurecido e a respectiva norma de ensaio	36
Tabela 2.3 Utilização de algoritmo de aprendizagem em argamassa	62
Tabela 3.1 Ensaaios realizados e total de provetes ensaiados por ensaio	72
Tabela 3.2 Matriz de confusão	81
Tabela 4.1 Argamassa de cimento aplicada em tijolo furado	106
Tabela 4.2 Argamassa de cimento aplicada em placa de betão	106
Tabela 4.3 Argamassa de cimento aplicada em bloco de betão leve	107
Tabela 4.4 Resumo dos resultados da campanha preliminar	108
Tabela 4.5 Massa volúmica (kg/m ³) dos substratos	109
Tabela 4.6 Porosidade aberta (%) dos substratos.....	109
Tabela 4.7 Resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade	110
Tabela 4.8 Resultados do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água	110
Tabela 4.9 Distribuição do volume intrudido por diâmetro de poros (substratos)	111
Tabela 4.10 Resultados da massa volúmica aparente (kg/m ³) aos 28 dias	115
Tabela 4.11 Resultados da porosidade aberta (%) aos 28 dias	115
Tabela 4.12 Resultados do coeficiente de absorção por capilaridade aos 28 dias	116
Tabela 4.13 Resultados do índice de secagem aos 28 dias	116
Tabela 4.14 Resultados do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água aos 28 dias	117
Tabela 4.15 Resultados da resistência à compressão (MPa) aos 28 dias	117
Tabela 4.16 Resultados do módulo de elasticidade (GPa) aos 28 dias	118
Tabela 4.17 Resultados da permeabilidade à água líquida (kg/m ² . min ^{0,5}) aos 28 dias	119
Tabela 4.18 Resultado da distribuição do volume intrudido por diâmetro de poros	119
Tabela 4.19 Massa volúmica (kg/m ³) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado) ..	133
Tabela 4.20 Massa volúmica (kg/m ³) (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)	134
Tabela 4.21 Porosidade aberta (%) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado).....	134
Tabela 4.22 Porosidade aberta (%) (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)	135
Tabela 4.23 Coeficiente de absorção por capilaridade (kg/(m ² . s ^{0,5})) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado).....	135
Tabela 4.24 Coeficiente de absorção por capilaridade (kg/(m ² . s ^{0,5})) (argamassas sujeitas à cura exterior – 300 dias)	136
Tabela 4.25 Índice de secagem (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)	136
Tabela 4.26 Índice de secagem (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)	136
Tabela 4.27 Permeabilidade ao vapor de água (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado).....	137

Tabela 4.28 Permeabilidade ao vapor de água (argamassas sujeitas à cura exterior)	137
Tabela 4.29 Resistência à compressão (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado) .	138
Tabela 4.30 Resistência à compressão (MPa) (argamassas sujeitas à cura exterior)	138
Tabela 4.31 Distribuição do volume intrudido por diâmetro de poros (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)	139
Tabela 4.32 Distribuição do volume intrudido por diâmetro de poros (argamassas sujeitas à cura exterior – 300 dias)	140
Tabela 4.33 Módulo de elasticidade dinâmico E (GPa) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado).....	141
Tabela 4.34 Módulo de elasticidade dinâmico E (GPa) (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)	141
Tabela 4.35 Permeabilidade à água líquida (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)	142
Tabela 4.36 Permeabilidade à água líquida (kg/m ² . min0,5) (Tubos de Karsten - argamassas sujeitas à cura exterior).....	142
Tabela 5.1 TF e TM - Distribuição dos poros e porosidade aberta	152
Tabela 5.2 Substratos - Diâmetro médio dos poros.....	153
Tabela 5.3 Substratos teste de normalidade (Shapiro-Wilk)	154
Tabela 5.4 Matriz de correlação (todos os substratos)	155
Tabela 5.5 Matriz de correlação (substratos cerâmicos)	155
Tabela 5.6 Matriz de correlação (substratos de betão)	155
Tabela 5.7 Matriz de correlação (apenas BB e PB).....	156
Tabela 5.8 Diâmetro médio dos poros da argamassa	164
Tabela 5.9 Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)	167
Tabela 5.10 Teste Levene.....	167
Tabela 5.11 ANOVA com a correção de Welch	168
Tabela 5.12 Post-Hoc Games-Howell	168
Tabela 5.13 Massa volúmica (Games-Howell)	169
Tabela 5.14 Porosidade aberta (Games-Howell).....	169
Tabela 5.15 Coeficiente de absorção por capilaridade (Games-Howell)	170
Tabela 5.16 Índice de secagem (Games-Howell).....	170
Tabela 5.17 Resistência à compressão (Games-Howell).....	171
Tabela 5.18 Correlação de Pearson entre as propriedades dos substratos e características das argamassas para substratos cerâmicos	172
Tabela 5.19 Correlação de Pearson entre as propriedades dos substratos e características das argamassas para substratos de betão.....	173
Tabela 5.20 Resumo da influência do substrato na argamassa aplicada	174
Tabela 5.21 Porosimetria por intrusão de mercúrio ao longo do tempo.....	178

Tabela 5.22 Resultado do Kruskall-Wallis (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)	186
Tabela 5.23 Resultado do Kruskall-Wallis (argamassas sujeitas à cura exterior)	186
Tabela 5.24 Post-Hoc Dunn - Massa volúmica (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)	187
Tabela 5.25 Post-Hoc Dunn - Massa volúmica (argamassas sujeitas a cura exterior)	187
Tabela 5.26 Post-Hoc Dunn - Porosidade aberta (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)	187
Tabela 5.27 Post-Hoc Dunn - Porosidade aberta (argamassas sujeitas a cura exterior)	188
Tabela 5.28 Post-Hoc Dunn – Coeficiente de absorção de água por capilaridade (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)	188
Tabela 5.29 Post-Hoc Dunn – Coeficiente de absorção de água por capilaridade (argamassas sujeitas a cura exterior)	189
Tabela 5.30 Post-Hoc Dunn – Índice de secagem (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)	189
Tabela 5.31 Post-Hoc Dunn – Índice de secagem (argamassas sujeitas a cura exterior)	190
Tabela 5.32 Post-Hoc Dunn – Resistência à compressão (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)	190
Tabela 5.33 Post-Hoc Dunn – Resistência à compressão (argamassas sujeitas a cura exterior)	191
Tabela 6.1 Resultados da avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina	198
Tabela 6.2 Resultado da classificação dos algoritmos de aprendizagem de máquina	199
Tabela 6.3 Matriz de confusão SVM	199
Tabela 6.4 Matriz de confusão RF	200
Tabela 6.5 Matriz de confusão ANN	201
Tabela 6.6 Resultado da avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina	203
Tabela 6.7 Resultado da predição da porosidade aberta do substrato	204
Tabela 6.8 Resultado da avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina	205
Tabela 6.9 Resultado da predição do coeficiente de absorção de água do substrato	205
Tabela 6.10 Avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina	206
Tabela 6.11 Resultado da predição da massa volúmica do substrato	207
Tabela 6.12 Avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina	208
Tabela 6.13 Resultado da predição da permeabilidade ao vapor de água do substrato	208
Tabela 6.14 Algoritmos utilizados por propriedade do substrato	210
Tabela 6.15 Valores da argamassa para predição	211
Tabela 6.16 Predição das características do substrato	211
Tabela 6.17 Valores médios dos substratos	212

Lista de abreviaturas, sigla e símbolos

μ-CT – Microtomografia de raios-X

ABB - Argamassa aplicada no bloco de betão endurecida aos 28 dias

ABB CE - Argamassa aplicada no bloco de betão a cura exterior por 300 dias

ABB EA - Argamassa aplicada no bloco de betão submetida ao envelhecimento acelerado

ABBL - Argamassa aplicada no bloco de betão leve endurecida aos 28 dias

ABBL CE - Argamassa aplicada no bloco de betão leve a cura exterior por 300 dias

ABBL EA - Argamassa aplicada no bloco de betão leve submetida ao envelhecimento acelerado

ANN – *Artificial Neural Network*

APB - Argamassa aplicada na placa de betão endurecida aos 28 dias

APB CE - Argamassa aplicada na placa de betão submetida a cura exterior por 300 dias

APB EA - Argamassa aplicada na placa de betão submetida ao envelhecimento acelerado

ATF - Argamassa aplicada no tijolo furado endurecida aos 28 dias

ATF CE - Argamassa aplicada no tijolo furado a cura exterior por 300 dias

ATF EA - Argamassa aplicada no tijolo furado submetida ao envelhecimento acelerado

ATM - Argamassa aplicada no tijolo maciço endurecida aos 28 dias

ATM CE - Argamassa aplicada no tijolo maciço a cura exterior por 300 dias

ATM EA - Argamassa aplicada no tijolo maciço. submetida ao envelhecimento acelerado

A_w – Coeficiente de absorção por capilaridade

BB - Bloco de betão

BBL - Bloco de betão leve

CV – Coeficiente de variação

DP – Desvio padrão

DRX - Difração de raios-X

FTIR - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

IS – Índice de secagem

MC - Argamassa moldada no molde prismático com dimensões compatibilizadas 1,5 x 4 x 4 cm³ endurecida aos 28 dias

MEV – Microscópio eletrónico de varrimento

MP - Argamassa moldada no molde prismático 16 x 4 x 4 cm³ endurecida aos 28 dias

MV – Massa volúmica

PA – Porosidade aberta

PB - Placa de betão

PV – Permeabilidade ao vapor de água

RC – Resistência à compressão

RF – *Random Forest*

SVM – *Support vector machine*

TF - Tijolo furado

TM - Tijolo maciço

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

1.2 Objetivos

1.3 Metodologia

1.4 Estrutura e organização

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Atualmente, um dos principais elementos de proteção das fachadas dos edifícios continua a ser o revestimento de argamassa, seja de cimento e/ou cal, tradicional ou industrial. A seleção de soluções de revestimento adequadas tem elevada importância na durabilidade do património edificado, e permite melhorar as condições de salubridade, conforto e segurança dos utilizadores.

Procura-se cada vez mais um revestimento que seja compatível com o substrato onde é aplicado, tendo em vista que a incompatibilidade das argamassas com os substratos poderá, por exemplo, levar ao seu destacamento da fachada, colocando em causa a segurança e a proteção do substrato, favorecendo o aparecimento de anomalias associadas.

O estudo da compatibilidade das argamassas com os substratos permite aferir soluções mais adequadas a utilizar, quer nas novas construções, quer na sua reabilitação. Deste modo, a durabilidade das argamassas de revestimento, dos substratos, e, conseqüentemente, de toda a fachada será otimizada. O aumento da durabilidade garantido pela compatibilidade de todos os elementos que constituem as fachadas permitirá aumentar o tempo de vida útil destas soluções.

Porém, as características mecânicas e físicas das argamassas são determinadas em ensaios controlados em laboratório sobre provetes normalizados, que não consideram a eventual influência dos diferentes substratos onde irão ser aplicadas. Logo, o desempenho assim determinado pode não representar o comportamento real da argamassa após aplicação em condições em serviço.

Torna-se então imprescindível o conhecimento das características das argamassas após a aplicação em substratos reais. Este fato reforça a importância do conhecimento aprofundado da compatibilidade entre a argamassa e o substrato e da influência do substrato no desempenho da argamassa aplicada.

Neste contexto, surge a necessidade de estudar a argamassa e a influência dos diferentes substratos nas suas características, para assim se ter a possibilidade de otimizar a sua

formulação, com o objetivo de torná-las mais adequadas e compatíveis com os substratos onde serão aplicadas.

A presente tese de doutoramento justifica-se pela necessidade de aprofundar o conhecimento do comportamento das argamassas após sua aplicação e pretende contribuir com a discussão sobre a forma de caracterização das argamassas. Tal conhecimento propiciará a capacidade de uma visão global e realística do comportamento das argamassas e será capaz de evidenciar a necessidade de uma formulação e caracterização mais adequada para o seu uso corrente em função do substrato.

Como consequência, esta evolução no domínio da compatibilidade dos elementos em questão, possibilitará otimizar o seu desempenho, bem como aumentar a vida útil e ainda reduzir o consumo de matérias-primas, resultando assim, em uma construção mais sustentável.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência exercida por diferentes tipos de substratos no desempenho físico e mecânico de uma argamassa industrial de revestimento, contribuindo assim, para um estudo mais aprofundado sobre o desempenho da argamassa em serviço.

Para isso, selecionaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar quais propriedades dos substratos mais influenciam o desempenho das argamassas;
- Identificar quais as características da argamassa que sofrem mais influência do substrato;
- Verificar se a influência do substrato no desempenho da argamassa se mantém ao longo do tempo;
- Determinar quais seriam as características do substrato mais adequadas para a argamassa em estudo.

1.3. Metodologia

Para atingir os objetivos referidos, foram realizadas extensas campanhas experimentais em que se procedeu à comparação do comportamento da argamassa moldada em provetes normalizados com o comportamento após aplicação em diferentes tipos de substratos.

Para a campanha experimental foram utilizados cinco substratos distintos, tendo sido os substratos selecionados face ao seu uso corrente nas construções. Os substratos escolhidos foram: tijolo cerâmico furado, tijolo cerâmico maciço, placa de betão, bloco de betão e bloco de betão leve. Em relação à argamassa, foi utilizada uma argamassa industrial pré-doseada de uso geral e adequada a todos os tipos de substratos selecionados, conforme indicação do fabricante.

A argamassa foi caracterizada em laboratório, em provetes moldados de acordo com as normas existentes e aplicada nos substratos. As argamassas foram aplicadas nos diversos substratos e foram posteriormente destacadas para caracterização. Em relação às condições de cura, os provetes normalizados foram submetidos a cura padrão (28 dias), de acordo com a norma vigente, enquanto os provetes aplicados nos substratos foram submetidos a cura sem controle do ambiente, com o objetivo de simular condições próximas do real. Para isso, os provetes foram divididos em três conjuntos com condições de cura distintas:

- Em laboratório, sem controle do ambiente, durante 28 dias;
- Em laboratório durante 28 dias, sem controle do ambiente, seguido de envelhecimento acelerado (de acordo com a norma EN 1015-21:2002);
- Em laboratório durante 28 dias, sem controle do ambiente e posteriormente submetidos ao ambiente exterior até completar 300 dias.

Paralelamente à caracterização mencionada, as argamassas, aplicadas nos diferentes substratos, também foram caracterizadas com técnicas de ensaios *in situ* (sem destaque do substrato), para as mesmas situações de cura.

Para compreender não apenas a influência do substrato nas características da argamassa, mas também as características das zonas da interface criada na ligação dos dois materiais, foram realizadas observações macro e microscópicas da mesma com a utilização de fotografias, lupa

estereoscópica, microtomografia de raios-X e microscópio eletrônico de varrimento. Esta análise foi realizada para argamassas endurecidas nos moldes e aplicadas aos substratos, aos 28 dias de cura.

Por fim, com os dados recolhidos aos 28 dias de cura, foram utilizados algoritmos de aprendizagem de máquina para prever as características do substrato mais adequadas para a argamassa em estudo.

1.4. Estrutura e organização

A tese de doutoramento está organizada numa estrutura composta por sete capítulos, descritos a seguir:

O capítulo 1 faz o enquadramento e introdução ao tema. Descreve os objetivos e metodologia. Por fim, é definida a estrutura e organização dos capítulos da tese.

O capítulo 2 aborda os conceitos fundamentais e teóricos relacionados com o desempenho e caracterização das argamassas. Para isso, conta com a descrição do estado da arte do tema.

O capítulo 3 descreve a metodologia de investigação e procedimentos de ensaio.

No capítulo 4 apresentam-se e os resultados das campanhas experimentais realizadas.

No capítulo 5 é realizada a análise e discussão dos resultados obtidos.

O capítulo 6 é relativo a utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina no contexto do estudo realizado.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido, com uma síntese crítica da utilidade das informações obtidas nas campanhas experimentais, sendo apontadas as sugestões para trabalhos futuros.

No final do trabalho são apresentadas as referências bibliográficas que serviram de base para o desenvolvimento deste estudo. Em anexo encontram-se descritos os resultados individuais dos ensaios e a base de dados utilizada nos algoritmos de aprendizagem de máquina.

2 ESTADO DA ARTE

- 2.1 Argamassa de revestimento
- 2.2 Argamassa industrializada
- 2.3 Caracterização das argamassas
- 2.4 Caracterização microestrutural
- 2.5 Interface argamassa e substrato
- 2.6 Influência do substrato nas características da argamassa aplicada
- 2.7 Algoritmos de aprendizagem de máquina aplicados ao estudo de argamassas
- 2.8 Síntese do capítulo

2. Estado da arte

2.1. Argamassas de revestimento

Os revestimentos exteriores dos edifícios têm importância fundamental para o desempenho do conjunto edificado, uma vez que por serem a camada mais exterior, são a primeira barreira de proteção contra o ataque de agentes externos, que podem ser ações do clima, tal como: chuva, vento, sol etc., ações mecânicas e ações referentes a intervenção humana com a poluição (Veiga, 1998; Magalhães, 2002).

As argamassas de revestimento de paredes mais comuns são à base de cimento e/ou de cal. Estes tipos de revestimentos continuam a ser os mais utilizados em Portugal (INE, 2011) e em outras regiões do mundo (Flores-Colen e Brito, 2015), quer seja em construções modernas ou antigas. Por isso, a compreensão do seu comportamento e a sua caracterização, tornam-se cada vez mais importantes (Silveira et al., 2019; Torres et al., 2019).

Estes revestimentos podem ser à base de cimento, para as construções modernas ou à base de cal (hidráulica ou aérea) para o caso de reabilitação de construções históricas ou antigas. Podem ser produzidos no próprio local da obra ou ser adquiridos prontos, com a dosagem pré-definida. A escolha correta do tipo de constituintes da argamassa é fundamental para o bom desempenho do revestimento, tendo em vista que a falta de compatibilidade com os demais componentes da edificação pode ocasionar anomalias e acelerar a degradação.

As argamassas de revestimento devem possuir algumas características específicas para obtenção de um bom desempenho de suas funções, tais como (Veiga 1998; 2009; Rodrigues, 2004):

- Boa trabalhabilidade;
- Resistência à fendilhação;
- Permeabilidade ao vapor de água;
- Compatibilidade ao substrato;
- Resistência aos choques;
- Baixa absorção capilar;

- Bom aspeto estético;
- Boa durabilidade.

As argamassas podem ter diversas utilizações de acordo com os padrões de uso, as aplicações podem ser em: revestimento de paredes (reboco, emboço e camada única), assentamento de alvenaria e revestimentos cerâmicos e juntas de revestimento. A argamassa pode ser doseada e misturada no local (argamassa tradicional), ser pré-doseada em fábrica e chegar à obra pronta para aplicação ou em pó, apenas com a necessidade da adição de água (argamassa industrializada) (Bellei et al., 2021; Gouveia, 2021).

No caso da argamassa utilizada como revestimento de paredes de alvenaria, de muros e de estruturas de betão, uma das propriedades a ser cumprida é a resistência de aderência ao substrato contribuindo para a redução da permeabilidade à água líquida. Do ponto de vista estético, é esperado que não se registre qualquer tipo de fissuração, nomeadamente de retração.

A argamassa é basicamente uma mistura homogénea dos seguintes materiais: água, um ou mais tipos de ligantes e agregados. Existe ainda a possibilidade da existência de adições e adjuvantes para a melhoria das suas propriedades (Carasek, 2017).

O ligante é um pó muito fino com capacidade de aglomerar uma proporção alta de agregados e, quando misturado com água, forma uma consistência viscosa e coesa. Deve garantir a adesão entre a argamassa e o substrato (Torres, 2014), sendo o ligante o elemento responsável pela maior durabilidade da mistura (Coutinho, 1988).

Quanto à sua composição e características, o ligante pode ser aéreo, hidráulico ou orgânico. O ligante hidráulico é constituído por um pó muito fino que, misturado com água, forma uma pasta, que solidifica por meio de reações químicas entre o pó e a água. O ligante aéreo, por outro lado, não endurece na presença de água pois depende do dióxido de carbono da atmosfera para transformá-lo em carbonatos. Finalmente, o ligante de natureza orgânica pode referir-se aos casos de hidrocarbonetos e resinas sintéticas (Gouveia, 2021; Torres, 2014; Velosa, 2006).

As argamassas frequentemente utilizadas na construção civil, em construções novas, contêm o cimento Portland como ligante. Quanto à sua produção, o cimento Portland é um pó fino industrializado, e o seu principal ingrediente ativo é o clínquer, que é produzido em grandes

fornos e calcinados a uma temperatura de cerca de 1450° C, contendo uma mistura de calcário e argila e possíveis materiais siliciosos, aluminosos e óxido de ferro, para garantir a natureza da ligação química (Torres, 2014; Velosa, 2006).

As argamassas de cimento têm uma elevada dureza devido ao seu elevado módulo de elasticidade que está diretamente relacionado com a resistência mecânica. Como resultado, é menos deformável o que contribui para o aparecimento de fissuração de retração (Recena, 2017).

A instabilidade geral, alta retração e fluência exibidas pelo ligante levam à necessidade da introdução de agregados nos revestimentos. Os agregados aplicados nas argamassas podem ser materiais granulares grossos e finos (até 4,75 mm), e aglomerados por um ou mais ligantes formam a composição das argamassas (Rodrigues, 2004).

Os agregados finos podem melhorar a aderência e a trabalhabilidade. Mas uma mistura de agregados finos e grossos torna o percentual de vazios mais adequado. Esse equilíbrio torna a argamassa endurecida com melhor resistência mecânica (Margalha et al., 2007).

Assim, o tipo e dimensão da areia utilizada nas argamassas, bem como a sua composição granulométrica, têm grande influência no comportamento dos rebocos pelo que a proporção e a escolha na mistura assumem um papel preponderante na qualidade final da argamassa de revestimento (Rodrigues, 2004).

Em Portugal, a areia é geralmente natural, extraída do leito de rios ou areeiros, em geral siliciosa, calcária, sílico-calcaria ou argilosa. Essas areias possuem distribuição granulométrica variável. A formulação de argamassas com areias de diferentes granulometrias acarreta argamassas com desempenho diferentes. Este problema não é tão evidente com argamassas industrializadas, pois os agregados presentes na sua composição são devidamente calibrados.

A quantidade de água a ser adicionada à mistura que compõe a argamassa deve permitir que ela seja fluida o suficiente para a correta aplicação, e assim obter uma boa distribuição no substrato (Rodrigues, 2004). Para argamassas industrializadas a quantidade de água é um fator fundamental e sempre deve ser utilizada a quantidade de água recomendada pelo fabricante (Paulo, 2006).

As adições e os adjuvantes são cada vez mais aplicados para melhorar significativamente determinadas propriedades das argamassas de forma a obter um desempenho específico (Sousa, 2010; Veiga, 1998). Um adjuvante é um produto que é incorporado na argamassa em quantidades inferiores a 5% da massa do cimento e as adições são incorporados em quantidades superiores a 5% (Coutinho, 1988). São exemplos de adjuvantes os plastificantes, superplastificantes, hidrófugos, aceleradores e retardadores do endurecimento. Como exemplo de adições podem-se referir as cinzas volantes, sílicas de fumo, pozolanas, etc. Tanto os adjuvantes como os aditivos melhoram uma ou várias características da argamassa.

Estas adições e adjuvantes podem ser:

- **Promotores de aderência** - geralmente produzidos com resinas sintéticas que adicionadas à argamassa durante a preparação (diluídos com água) aumentam a adesão sem aumentar o teor de cimento. Também aumentam a resistência à tração, pois melhoram a adesão entre grãos e reduzem o módulo de elasticidade. Existem também promotores de aderência que se aplicam ao substrato (Veiga, 1998; Sousa, 2010).
- **Hidrófugos** - a finalidade do seu uso é evitar a infiltração ou circulação de água na solução. Funcionam alterando a estrutura poros reduzindo a tensão capilar. Quando os capilares são reduzidos, aumenta-se a impermeabilização (Veiga, 1998; Souza, 2010).
- **Introdutores de ar** - os introdutores de ar causam a formação de pequenas bolhas de ar fechadas, esféricas, localizadas no espaço entre o cimento e o agregado. Com isso, melhora-se a capacidade de impermeabilização, resistência ao congelamento-descongelamento e resistência aos sais (sulfato) (Veiga, 1998; Sousa, 2010).
- **Plastificantes** – a sua utilização melhora a trabalhabilidade e reduz a segregação. Assim diminui-se a quantidade de água e de ligante, com o benefício de redução da retração. O princípio de funcionamento traduz-se na dispersão das partículas de cimento na fase aquosa da argamassa aumentando a sua superfície específica, melhorando a sua hidratação (Veiga, 1998).
- **Retentores de água** - os retentores de água regulam a perda de água da amassadura durante a secagem da argamassa. Com isso, procura-se evitar as fissuras por retração, tornando o revestimento menos suscetível às intempéries e a substratos muito absorventes (Veiga, 1998; Sousa, 2010).

- **Fibras** - a adição de fibras aumenta a resistência à tração, reduzindo a fendilhação e consequentemente reduzindo a penetração de água (Torres, 2014).
- **Pigmentos** - são óxidos metálicos para conferir cor (Veiga, 1998).
- **Modificadores do tempo de presa** - Podem ser ativadores de endurecimento, aceleradores de presa ou retardadores de presa. Estes produtos podem acelerar o endurecimento, reduzindo em pouca proporção a trabalhabilidade, acelerar ou retardar a presa modificando os mecanismos de endurecimento (Sousa, 2010; Paulo, 2006).
- **Materiais pozolânicos naturais ou artificiais** - São, em geral, compostos de sílica e alumina que em contato com a argamassa conferem estabilidade à mistura e possuem propriedades aglomerantes (Velosa, 2006; Sousa, 2010).
- **Cinzas volantes** - são um subproduto da combustão do carvão em centrais termoelétricas. Parte das cinzas queimadas no incinerador da central é expelida pela chaminé, enquanto o restante fica na base do forno. As cinzas volantes são coletadas por coletores eletrônicos e mecânicos para não poluir o meio ambiente. Apresentam-se como um pó muito fino (Torres, 2014; Sousa, 2010). A utilização de cinzas volantes resulta em redução do calor de hidratação, da retração e da permeabilidade (Sevim et al., 2020).
- **Escória de alto-forno** - é um subproduto não metálico obtido da fundição do ferro em alto-forno. Possui formato irregular e a maior parte de sua massa está no estado amorfo. Utilizado na fabricação do cimento (Sousa, 2010).

Outra parte importante do sistema de revestimento das edificações é a relação da argamassa com os substratos onde são aplicadas. Em relação aos substratos, as características que mais afetam o desempenho do sistema de revestimento são: a resistência mecânica, porosidade, rugosidade e absorção (Bellei et al., 2021).

A resistência mecânica deve ser considerada em conjunto com a deformabilidade do sistema para um bom desempenho. A porosidade influencia diretamente o transporte de água e a absorção da argamassa, principalmente nos primeiros momentos, após a aplicação e é determinante na aderência entre a argamassa e o substrato. A rugosidade é importante no desenvolvimento de aderência, substratos rugosos têm uma superfície de contato maior com a argamassa aplicada, substratos lisos geralmente oferecem valores de aderência mais baixos. A

absorção do substrato é a principal causa de perda de água da argamassa após a aplicação e em consequência da alteração da microestrutura da argamassa nesta zona de contacto (Sousa, 2010; Arromba, 2011).

Portanto, como referido, para um bom desempenho da argamassa, pretende-se que a argamassa tenha baixa absorção de água, permeabilidade ao vapor de água adequada, boas condições de aderência ao substrato, resistência mecânica adequada ao substrato e elevada capacidade de deformação entre outras (LNEC, 1968; Flores-Colen, 2009; Martins, 2008; Arromba, 2011).

Com o aumento de trabalhos de investigação relacionados com a área da sustentabilidade, o estudo das argamassas tem seguido essa tendência, nomeadamente com a introdução de materiais sustentáveis ou reciclados na composição das argamassas. Têm surgido um elevado número de trabalhos relativos à caracterização destes novos produtos de revestimento.

Esses trabalhos analisam o comportamento de argamassas que incorporam resíduos como cortiça, vidro, cinza volante, borracha, entre outros, com o objetivo de substituir parte do ligante ou do agregado e, eventualmente conseguir um desempenho melhorado, aliando uma maior sustentabilidade e reutilização de resíduos (Aliabdo et al., 2016; Tan e Du, 2013; Li et al., 2004; Na e Xi, 2017; Shaikh et al., 2014; Castro et al., 2010; Mounir et al., 2014).

Porém, é necessário o estudo e compreensão deste material para que estas características sejam atingidas. De forma geral, o estudo das argamassas inicia-se com sua formulação e caracterização, passando também pelo desempenho em serviço e ainda a interação com o substrato, nomeadamente a formação da interface e sua adesão. Logo, é importante que a argamassa de revestimento seja estudada como sistema de revestimento, considerando a relação argamassa/substrato.

Ainda que vários autores tenham realizado estudos sobre a interface argamassa/substrato e dos fatores que atuam na adesão do conjunto (Barroso de Aguiar e Cruz, 1998; Carvalho, 2005; Torres et al., 2018) são escassos aqueles que se debruçam sobre a alteração das características da argamassa após aplicação em diferentes tipos de substratos.

2.2. Argamassas industrializadas

As argamassas industriais, utilizadas há algumas décadas em quase toda a Europa. A introdução deste tipo de argamassa em território português ocorre a partir da década de 1990 do século XX (Paulo, 2006).

A norma NP EN 998-1 (IPQ, 2017) define a argamassa industrializada em função do processo de produção como: argamassa industrial, argamassa pré doseada e argamassa pré misturada.

- **Argamassa industrial** - são argamassas doseadas e misturadas em fábrica, podendo ser fornecidas "secas" devendo ser acrescentada água à mistura ou em pasta já pronta para utilização.
- **Argamassa Pré-doseada** - são argamassas que possuem os componentes que são doseados totalmente em fábrica, mas misturados em obra de acordo com o fabricante.
- **Argamassas Pré-misturadas** – os seus constituintes são doseados e misturados em fábrica, fornecidos ao estaleiro da obra, onde outros constituintes especificados, como o cimento, são adicionados.

Ainda são feitas duas outras classificações em relação às argamassas, segundo a conceção ou em função das propriedades e utilização.

As argamassas segundo a conceção, podem ser argamassas de desempenho ou de formulação. As argamassas de desempenho são argamassas cuja composição e processo produtivo são escolhidos pelo fabricante com a finalidade de atingir propriedades específicas. As argamassas de formulação são produzidas com proporções predeterminadas, cujas propriedades são consideradas resultantes das proporções declaradas.

Em relação às suas propriedades e utilização, as argamassas são classificadas como:

- Argamassa de uso geral para rebocos exteriores/interiores (GP)
- Argamassa leve para rebocos exteriores/interiores (LW)
- Argamassa de cor para rebocos (CR)
- Argamassa monocamada para rebocos exteriores (OC)
- Argamassa de renovação para rebocos (R)

- Argamassa de isolamento térmico para rebocos (T)

A norma referida estabelece ainda as propriedades das argamassas endurecidas em função dos diferentes campos de utilização e condições de exposição. A tabela 2.1 classifica as argamassas em relação a resistência à compressão, absorção de água e condutibilidade térmica. A tabela 2.2 sintetiza os requisitos normativos para argamassas endurecidas, segundo a EN 998-1 (IPQ, 2017).

Tabela 2.1 Classificação das propriedades da argamassa endurecida

Propriedades	Categorias	Valores
Gama de resistência à compressão após 28 dias	CS I	0,4 N/mm ² a 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 N/mm ² a 5,0 N/mm ²
	CS III	3,5 N/mm ² a 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6 N/mm ²
Absorção de água por capilaridade	W _c 0	Não especificado
	W _c 1	$C \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W _c 2	$C \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Condutibilidade térmica	T 1	≤ 0,1 W/(m.K)
	T 2	≤ 0,2 W/(m.K)

Fonte: NP EN 998-1 (IPQ, 2017)

Os desafios e exigências impostos pela indústria da construção, como rapidez de execução, estaleiros com dimensões reduzidas, falta de mão-de-obra especializada, utilização de agregados sem a devida avaliação, têm levado a uma redução da utilização de argamassas de revestimento tradicionais, e pode favorecer o desenvolvimento de soluções industriais (Torres et al., 2018; Flores-Colen, 2009).

As argamassas convencionais ainda são amplamente utilizadas, mas apresentam desvantagens significativas em relação a uma solução industrial (Garcia, 2005). O uso indevido de matérias-primas, dosagens incorretas de componentes e controle inadequado da execução pode

resultar num aumento de custo e prazo e diminuição da qualidade das argamassas aplicadas. Estas podem ser algumas das desvantagens da utilização das argamassas tradicionais formuladas totalmente em obra (Gomes, 2009).

As argamassas industriais são rigorosamente produzidas por seus fabricantes e introduzem diversas vantagens em relação às argamassas tradicionais formuladas localmente. Esses produtos têm algumas vantagens como a velocidade de execução, redução do espaço do estaleiro destinado ao armazenamento de materiais, facilidade do controlo de qualidade, entre outras (Torres, 2014). Por possuírem uma produção industrial, destacam-se pelo controlo de qualidade dos constituintes e em sua proporção, o que reduz a possibilidade de aparecimento de anomalias (Recena, 2017).

A argamassa industrial possui um custo de material superior à argamassa tradicional executada em obra. Porém o custo final (soma de material e mão de obra), o menor desperdício de material, o aumento da produtividade que conduz a uma redução do prazo, é capaz de tornar a solução industrial mais vantajosa do que a tradicional (Silva e Nakakura, 2001).

A composição da argamassa industrial é um fator chave na sua eficácia e raramente a proporção de sua composição é divulgada (Ferreira, 2012). Uma solução industrial é uma mistura de vários elementos que são precisamente combinados em fábrica de acordo com o uso pretendido (Martins e Assunção, 2010).

A argamassa industrial é projetada normalmente em monocamada para desempenhar as funções do reboco multicamada tradicional. A composição é semelhante, com a diferença que a dosagem é feita de acordo com uma composição testada, pelo que a mistura de ingredientes selecionados e retificados é feita com a adição de pequenas quantidades de adjuvantes e adições (APFAC, 2008), para introduzirem melhorias no seu comportamento, como: introdutores de ar, agentes hidrófugos, redutores de água, retardadores de presa.

Tabela 2.2 Requisitos para as propriedades do produto endurecido e a respetiva norma de ensaio

Parâmetro	Método de ensaio	GP	LW	CR	OC	R	T
Massa volúmica (kg/m ³)	EN 1015-10	Gama declarada de valores	Gama declarada de valores ≤ 1300	Gama declarada de valores			
Resistência à compressão (categorias)	EN 1015-11	CS I a CS IV	CS I a CS III	CS I a CS IV		CS II	CS I a CS II
Aderência (N/mm ²) e tipo de fratura (A, B ou C)	EN 1015-12	\geq Valor declarado e tipo de fratura	\geq Valor declarado e tipo de fratura	\geq Valor declarado e tipo de fratura	-	\geq Valor declarado e tipo de fratura	\geq Valor declarado e tipo de fratura
Aderência após ciclos de cura (N/mm ²) e tipo de fratura (A, B ou C)	EN 1015-21	-	-	-	Valor declarado e tipo de fratura	-	-
Absorção de água por capilaridade	EN 1015-18	W 0 a W 2	W 0 a W 2	W 1 a W 2	$\geq 0,3$ kg /m ² após 24h	W 1	W 1
Penetração de água após ensaio de capilaridade (mm)	EN 1015-18	-	-	-	≤ 5 mm	-	-
Permeabilidade à água após ciclos de cura (ml/ cm ² , após 48h)	EN 1015-21	-	-	-	≤ 1 ml/ cm ² após 48h	-	-
Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água (μ)	NP EN 1015-19	\leq valor declarado	\leq valor declarado	\leq valor declarado	\leq valor declarado	≤ 15	≤ 15
Condutibilidade térmica (W/ m. K)	EN 1745 A.12Tabela EN 1745 Ponto 4.2.2	Valor tabelado				-	-
Reação ao fogo (classe)	NP EN 13501-1	Declarados: rebocos, com % em massa ou em volume (a mais elevada) de matéria orgânica $\leq 1\%$, classificados como classe A1, sem efetuar teste; rebocos, com % em massa ou em volume (a mais elevada) de matéria orgânica $\geq 1\%$, classificados de acordo com NP EN 13501-1 e declarada respetiva classe de reação ao fogo.					
Durabilidade	-	Não há requisitos prescritos, exceto para monocamadas, em que a aderência e a permeabilidade à água, após ciclos de cura, têm de ser avaliados					

Fonte: Adaptado NP EN 998-1 (IPQ, 2017)

Estas incorporações devem ser feitas com elevada precisão de dosagem que são inviáveis de realizar em argamassas tradicionais feitas no estaleiro (Torres, 2014). Alguns produtos apresentam também fibras sintéticas, que conferem maior resistência a fendilhação e em consequência, maior durabilidade (Gomes, 2009).

As argamassas industriais podem ser aplicadas de forma manual ou mecanizada. A argamassa industrial quando projetada de forma mecânica apresenta menor permeabilidade a água e resistência adesiva superior em relação ao método convencional (Duailibe et al., 2005; Fernandes et al., 2009).

A aplicação de uma argamassa industrializada, através de um processo mecânico constante, permite um revestimento mais uniforme em relação ao método convencional. Este processo, devido à ausência de interferência humana na aplicação, promove a adesão contínua e uniforme, evitando a formação de fendas, como no método manual, o que torna o revestimento homogêneo em toda a área aplicada. (Silva, 2016).

A mecanização do processo de revestimento da argamassa contribui também para a redução tempo de execução do trabalho, e em consequência, do prazo final do empreendimento, pela redução do tempo no processo de revestimento (Tozzi et al., 2009; Viera e Nakakura, 2017).

Azeredo (2007) afirma que um profissional leva um dia para aplicar manualmente o revestimento de argamassa convencional em uma superfície de 14 m². Por sua vez, utilizando o sistema mecanizado, com o mesmo tempo, aplica-se numa área de 29 m², ou seja, um ganho de 107 % em produtividade.

Também, Souza e Pigozzo (2018) no seu estudo concluíram que a execução da argamassa industrial por projeção é 2,5 vezes mais eficiente com aproximadamente 15% de redução de custo em relação à argamassa e método convencional.

Devido a estes factos as argamassas industriais têm vindo a popularizar-se cada vez mais e tornando-se cada vez mais específicas. Existe atualmente uma grande variedade de produtos como argamassas de assentamento de alvenaria, argamassas para reboco, cimentos cola, argamassas para juntas, argamassas para regularização de pavimentos, argamassas de reabilitação, entre outras.

2.3. Caracterização das argamassas

As argamassas são caracterizadas em laboratório, de acordo com as normas aplicáveis. Para isso, são utilizados provetes prismáticos moldados em moldes metálicos com dimensões definidas pelas normas.

Em geral, como visto anteriormente, pretende-se uma argamassa de revestimento com elevada permeabilidade ao vapor de água e elevada capacidade de secagem, baixo coeficiente de absorção de água por capilaridade, resistência à compressão e tração compatíveis com o substrato e boa aderência.

A obtenção das características ideais das argamassas é conseguida através de um equilíbrio entre elas, visto que estão interligadas, como por exemplo a capacidade de impermeabilização e a secagem (Torres et al., 2018).

Para obter uma boa aderência, a argamassa deve ter uma boa trabalhabilidade, que facilite a sua aplicação. Essa consistência por espalhamento permite a fluidez na cobertura de toda a área do substrato, revestindo fissuras e reentrâncias. O ajuste da plasticidade da argamassa está relacionado com a quantidade de água utilizada, pelo teor de ar, pela incorporação de adjuvantes e qualidade dos agregados utilizados (Carasek, 1996). Por outro lado, a boa aderência permite uma melhor distribuição das tensões e auxilia na resistência à fendilhação (Veiga, 1998).

A fendilhação pode ocorrer por diversas razões, como: incapacidade da argamassa de resistir às tensões instaladas, variações de temperatura, ações de gelo e degelo, movimentação do substrato ou carbonatação. A fendilhação relaciona-se com a retração, módulo de elasticidade e resistências mecânicas (Rodrigues, 2004; Veiga e Faria, 1990). A tendência de fendilhação varia de forma proporcional à relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração (Torres, 2014).

As resistências mecânicas (de tração e compressão) são características importantes no comportamento das argamassas, pois traduzem a capacidade de a argamassa resistir as tensões induzidas, sejam estáticas ou dinâmicas (Carasek, 1996). Quanto maior for a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão, mais dúctil e resistente será a argamassa (Torres, 2014).

A quantidade de água na mistura da argamassa é fator determinante na resistência mecânica (Campiteli e Nasciso, 2008). O aumento do teor de ligante conduz a argamassas mais resistentes, que apresentam maior aderência, porém uma resistência elevada pode ser incompatível com o substrato e prejudicar a proteção dos mesmos (Rodrigues et al., 2007). As dosagens excessivas levam ao aumento da fendilhação (Carasek, 1996). Portanto deve-se procurar uma relação água/ligante bem doseada que não prejudique o desempenho do revestimento.

As argamassas são materiais porosos, de acordo com a dimensão dos poros, o transporte de água no seu interior pode dar-se por difusão de vapor ou por condução capilar, sendo que esta última se verifica apenas para teores de humidade acima do teor de humidade crítico. Por um lado, a permeabilidade ao vapor de água deve ser elevada e permitir que a alvenaria seque de forma rápida e que o vapor de água consiga sair facilmente e por outro lado a absorção por capilaridade deve ser a menor possível para evitar a penetração da água das chuvas (Torres, 2014).

Para uma adequada capacidade impermeabilização do revestimento, que significa a capacidade de resistir à entrada de água e permitir a secagem do conjunto, é necessário o equilíbrio entre a permeabilidade ao vapor de água, o índice de secagem e a absorção de água por capilaridade, tendo em vista que essas propriedades estão relacionadas (Torres, 2014; Veiga, 1998; Gouveia, 2021).

A permeabilidade ao vapor de água é um fenómeno de difusão onde ocorre a transferência de vapor dentro do material quando este está submetido a ambientes com diferentes humidades relativas (Brito, 2009). Então, a elevada permeabilidade ao vapor de água permite que a secagem do conjunto argamassa/substrato seja mais rápida e também permite a saída do vapor de água do interior dos ambientes (Torres, 2014).

O coeficiente de absorção de água por capilaridade representa a capacidade de absorção de água do material por meio de forças de sucção capilares. Além do aparecimento de bolores e fungos por humedecimento prolongado que podem levar ao descolamento do revestimento, a presença da água absorvida pode ser um problema nos ciclos de gelo/degelo (Arandigoyen et al., 2005).

O congelamento da água no interior do revestimento de argamassa ocasiona o aumento de volume da água contida nos poros e como consequência podem ocorrer fissurações e com isso, a perda de desempenho do conjunto (Botas, 2009).

Tanto a permeabilidade ao vapor de água como a absorção de água por capilaridade estão normalmente relacionadas com a porosidade da argamassa. Em geral o aumento da porosidade conduz ao aumento da permeabilidade ao vapor de água (Pereira, 2008).

A estrutura porosa determina o comportamento do material endurecido em relação às diversas influências que pode sofrer, em termos do comportamento mecânico, absorção de água por capilaridade, difusão de vapor de água e efeito de sais solúveis (Sousa, 2010).

A porosidade da argamassa pode ser definida como a quantidade de vazios existentes no seu interior. Sendo esta propriedade uma das mais importantes no comportamento das argamassas (Gouveia, 2021; Soares, 2021; Rato, 2006).

A porosidade do revestimento influencia diretamente do desempenho da argamassa em relação à permeabilidade ao vapor, absorção por capilaridade, secagem e resistências mecânicas. Em relação às argamassas correntes o valor da porosidade aberta pode variar entre 18% e 45% (Velosa, 2006).

Existem dois tipos de porosidade, a porosidade aberta e fechada. A primeira é constituída por poros que possuem ligação entre si e formam uma rede contínua de vazios. A porosidade aberta possui uma relação inversamente proporcional com a massa volúmica (Sequeira et al., 2012). Já a porosidade fechada são poros isolados contidos no interior da argamassa que não contribuem para o transporte de fluídos (Rato, 2006).

Esse meio contínuo interligado de poros, no qual diferentes diâmetros de poros conectam-se entre si, são classificados conforme a sua distribuição e dimensão.

De acordo com Pipilikaki e Beazi-katsioti (2009), os poros podem ser classificados de acordo com a sua dimensão e com a influência que têm no transporte de água:

- **Poros $\varnothing > 10 \mu\text{m}$** são geralmente vazios de ar sem influência na capilaridade da água, mas podem ser vazios interpartículas, influenciando o transporte de vapor de água.

- **Poros $0.05 < \varnothing < 10 \mu\text{m}$** são poros com grande efeito na absorção por capilaridade.
- **Poros $0.01 < \varnothing < 0.05 \mu\text{m}$** são poros com efeito na permeabilidade ao vapor de água.
- **Poros $0.025 < \varnothing < 0.01 \mu\text{m}$** são pequenos poros que afetam a retração e as características das matrizes de cimento hidratado.

Um ponto fundamental da caracterização das argamassas é o processo de cura. A cura das argamassas de revestimento pode ser feita de forma natural (de acordo com as normas ou sem controle laboratorial) ou por meio de envelhecimento acelerado.

O processo de cura (endurecimento) das argamassas relaciona-se com o desenvolvimento da resistência mecânica e está diretamente ligado aos processos de carbonatação e hidratação e, portanto, pode variar em função da temperatura e humidade relativa do ar. A influência da temperatura no processo de cura procura ditar a velocidade do processo e não favorecer ou atrapalhar a hidratação ou carbonatação (Moura, 2007).

A norma EN 1015-11 (CEN, 2019), define o procedimento de cura, durante 28 dias, como:

- **Primeiros 2 dias:** temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humidade relativa de $95\% \pm 5\%$ ou em saco de polietileno (no molde);
- **5 dias seguintes:** temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humidade relativa de $95\% \pm 5\%$ ou em saco de polietileno (sem o molde);
- **21 dias restantes:** temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humidade relativa de $65\% \pm 5\%$ (sem o molde).

A norma EN 1015-21 (CEN, 2002), define o procedimento para o envelhecimento acelerado da seguinte forma:

1ª série – quatro ciclos

- $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante $8\text{h} \pm 15 \text{ min}$;
- $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ humidade relativa durante $30 \pm 2 \text{ min}$;
- $-15 \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante $15 \pm 15 \text{ min}$;
- $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ humidade relativa durante $30 \pm 2 \text{ min}$.

2ª série – quatro ciclos

- Emergir parcialmente (5 mm) os provetes com a face rebocada na água a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ durante $8 \text{ h} \pm 15\text{min}$;
- $20 \pm 2^\circ\text{C}$ / $65 \pm 5\%$ humidade relativa durante $30 \pm 2\text{min}$;
- $-15 \pm 1^\circ\text{C}$ durante $15\text{min} \pm 15\text{min}$;
- $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ humidade relativa durante $30 \pm 2\text{min}$.

A utilização do envelhecimento acelerado conduz a resultados mais agressivos quando comparado com o envelhecimento natural. Então a utilização desta técnica torna-se eficiente para a simulação da degradação da argamassa ao longo do tempo (Obrzut et al., 2020).

Toda esta caracterização é feita em moldes metálicos, como já referido, e o que se verifica na prática é que a argamassa é aplicada em substratos de diferentes materiais e em condições diferentes das controladas em laboratório. Portanto, esta caracterização deveria considerar a contribuição do substrato, das condições de aplicação, das diferentes condições de cura no desempenho da argamassa formulada.

2.4. Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural é definida como um conjunto de técnicas que permitem a análise de algumas características estruturais internas, ao nível microscópico, que afetam as propriedades dos materiais (Burlion et al., 2006; Candeias et al., 2006).

Dentro das técnicas avançadas de caracterização microestrutural, a microtomografia de raios-X (μ -CT) pode ser considerada μ -CT é uma evolução da tomografia computadorizada de raios-X amplamente utilizada na área médica, com grande sucesso. As aplicações da μ -CT cobrem os domínios científicos que precisam estudar materiais complexos em diferentes escalas espaciais e temporais, tais como: paleontologia, património e relíquias antigas, misturas asfálticas, mineralogia de rochas, metais, compósitos, betão, entre outros. A técnica começou a popularizar-se apenas no início dos anos 2000 (Brisard et al., 2020; da Silva, 2018; Vicente et al. 2017).

A μ -CT pode ser definida como uma técnica de imagem baseada em radiografias capaz de produzir imagens em três dimensões e visualizar a estrutura interna dos materiais na escala micrométrica, sem causar danos à amostra estudada, permitindo o seu reaproveitamento (Bernardes et al., 2015; Landis e Keane, 2010). Com esta técnica é possível que os utilizadores extraiam informações quantitativas e qualitativas sobre as imagens geradas por tomografia, o que é uma vantagem sobre outras técnicas de análise 2D (Braz et al., 1999; Ketcham e Carlson, 2001; Landis e Keane, 2010; Kak e Slaney, 2001; Hsieh, 2003).

Esta técnica tem-se popularizado na análise microestrutural de materiais cimentícios, uma vez que o desempenho desses materiais é controlado pela sua microestrutura, que influencia as propriedades que determinam a sua durabilidade (Gallucci et al., 2007).

A aplicação da μ -CT na análise de argamassas pode ser dividida em três áreas: análise de estrutura sólida e espaço poroso; processos ao longo do tempo; caracterização e formulação de novos materiais. Apresentam-se alguns estudos que exemplificam a aplicação e utilização desta técnica.

A μ -CT é capaz de distinguir a estrutura sólida e o espaço poroso de um material através da atenuação e opacidade do material em relação aos raios-X. Com esta técnica é possível observar a conectividade dos poros e fissuras antes do processo de autocura (Pei et al., 2017); verificar e quantificar a alteração microestrutural causada por danos devido à exposição a altas temperaturas (Yao et al., 2017; Yao et al., 2017; Yao et al., 2018); observar a geometria e as características das fissuras em argamassas sob carregamento cíclico uniaxial (Zhou et al., 2018); e ainda utilizar métodos de processamento de imagens para identificar fissuras, pasta de cimento e poros, e assim obter informações quantitativas (Hong et al., 2019).

A monitorização das transformações é possível com a μ -CT devido à capacidade de reutilizar a amostra sem danificá-la. Isso possibilita testar a mesma amostra em diferentes idades e, assim, acompanhar a evolução do fenómeno a ser investigado. No contexto das argamassas, existe interesse na utilização da μ -CT na área da lixiviação, carbonatação e na evolução da porosidade.

Sugiyama et al. (2010) submeteram uma pasta de cimento e uma argamassa a um ensaio de lixiviação acelerada por migração técnica eletroquímica. A análise realizada com microtomografia revelou um aumento significativo do volume dos poros, resultando no

aumento do grau de conectividade porosa da matriz de cimento, tanto na pasta de cimento como na argamassa degradada.

Sadowski e Stefaniuk (2017) no seu trabalho, utilizaram a μ -CT para avaliar a evolução da porosidade na área da interface com o substrato ao longo do tempo, tendo definido uma zona de interface de 2 mm a partir do substrato. Estes autores concluíram que ocorre um aumento da microporosidade na camada de interface com o tempo e ocorre um aumento da microporosidade da argamassa quando existe um afastamento da interface.

Lacerda et al. (2017) procuraram monitorizar o progresso da frente de carbonatação com fenolftaleína e por meio da medição da variação do pH em compostos cimentícios. A técnica de microtomografia de raios-X foi utilizada para avaliar a estrutura de vazios das amostras. A μ -CT permitiu quantificar o tamanho, distribuição e conectividade dos poros, sem causar alterações na estrutura original da amostra. Os autores indicam que μ -CT permite a quantificação de parâmetros microestruturais relevantes para o estudo da difusão de dióxido de carbono em compostos cimentícios.

O conhecimento microestrutural dos materiais é extremamente relevante para a determinação de suas propriedades. Assim, a μ -CT, pelo seu caráter não destrutivo, que permite a visualização em três dimensões, a análise da ligação entre as partículas e a monitorização do comportamento ao longo do tempo, é uma grande mais-valia para a formulação de novos materiais. Este tipo de análise pode levar a uma compreensão mais ampla do comportamento do material a ser desenvolvido.

Sultangaliyeva et al. (2020) no seu estudo utilizaram a μ -CT para melhorar a compreensão do efeito das fibras sintéticas flexíveis quando adicionadas a uma argamassa de cimento. O uso da μ -CT auxiliou na perceção da forma como essas fibras se deformam.

Praneeth et al. (2021) na sua pesquisa usou biochar como um substituto parcial para areia em argamassas de cimento. A μ -CT auxiliou na caracterização da porosidade das amostras, mostrando um aumento de até cinco vezes na porosidade aberta das amostras.

Zhou et al. (2021) no seu estudo sobre argamassas com polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), utilizando a μ -CT na caracterização microestrutural da porosidade e densidade do

material, concluíram que o uso do reforço não teve impacto considerável na porosidade do material.

A μ -CT, como todas as técnicas de ensaio, apresenta vantagens e limitações, portanto, para uma caracterização microestrutural mais precisa, é necessário combinar esta técnica com outras.

As principais vantagens desta técnica são as seguintes (Landis e Keane, 2010; Brisard et al., 2020; da Silva, 2018):

- Análise da distribuição espacial tridimensional dos componentes da amostra;
- Possibilidade de reutilização da amostra para repetição de testes, por se tratar de uma técnica não destrutiva;
- Possibilidade de visualizar o interior da amostra para detetar defeitos, avaliando o desenvolvimento de microfissuras, densidade tomográfica e porosidade de diferentes tipos de materiais.

Como limitações da técnica, é possível identificar (Landis e Keane, 2010; Cnudde et al. 2011; Diamond e Landis, 2007):

- Necessidade de amostra de tamanho muito reduzido, o que dificulta a sua obtenção e compromete a sua representatividade;
- Limitação da resolução das imagens; o fato de não ser aplicável a materiais opacos aos raios-X.

Para o estudo da microestrutura é necessário a combinação de escalas de observação, exigindo o uso de técnicas laboratoriais avançadas, como microscópio eletrônico de varrimento (MEV), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e difração de raios-X (DRX).

O microscópio eletrônico de varrimento (MEV) é um poderoso instrumento que permite a observação e a caracterização de materiais heterogêneos orgânicos e inorgânicos e de superfícies, à escala do micrómetro e nanómetro.

Como potencialidades do MEV, tem-se: ampliação de até 100.000 vezes, análise da interface entre materiais, visualização de microporos e nanoporos, análise e identificação dos cristais da pasta ligante de materiais cimentícios (Dulliu, 1999; Cnudde et al., 2006)).

Como limitações: apenas análise da superfície do material, materiais hidratados e liberando gases são excluídos, as mostras devem ser pequenas o suficiente para caber na câmara do microscópio (Dedavid e Machado, 2017).

A Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica utilizada para identificar materiais orgânicos e a maioria dos materiais inorgânicos. Esta técnica mede a absorção da radiação IV da amostra em relação ao comprimento de onda. As faixas de absorção de infravermelhos identificam estruturas e componentes moleculares (Gominho, 2016; Hanke, 2016).

Como potencialidades da técnica FTIR, tem-se: análise quantitativa e qualitativa, determinação da composição mineralógica, identificação de substâncias orgânicas, entre outras (Teixeira, 2017; Gominho, 2016).

Quanto às limitações, pode-se listar: misturas complexas podem levar a interpretações incorretas; não possui grande precisão para soluções aquosas; não detecta entidades monoatômicas e moléculas diatômicas; entre outras (Teixeira, 2017).

A difração de raios-X (DRX) é uma técnica correntemente utilizada na identificação de minerais, constituído um dos métodos mais fiáveis na identificação mineralógica em materiais que apresentam uma estrutura cristalina. A interação entre a matéria cristalina e a radiação X dá lugar a uma dispersão, que é provocada pelo ordenamento interno da matéria cristalina. A relação entre a radiação e a estrutura do cristal é dada pela lei de Bragg (Fontes, 2011; Teixeira, 2017).

De entre as potencialidades da técnica DRX pode-se listar: análise da composição mineralógica das fases cristalinas, fácil execução do ensaio, avaliação do grau de cristalinidade dos minerais, entre outras (Tuna et al., 2015).

Em relação a limitações da DRX, tem-se: apenas identifica minerais cristalinos, contaminantes afetam os resultados, entre outras (Tuna et al., 2015; Teixeira, 2017).

Como resumo, percebe-se que todas as técnicas possuem potencialidades e limitações, porém oferecem escalas de observação distintas e complementares. Assim, uma integração desses ensaios poderá auxiliar na descrição da microestrutura do material de forma mais completa (Travincas et al., 2022a), possibilitando uma análise mais próxima de responder às questões de investigação microestrutural, bem como sua relação com a macroestrutura dos materiais.

Essas técnicas, aliadas a outros tipos de observação, como o exame com lupa binocular e registo fotográfico, permitem obter informações detalhadas sobre a estrutura sólida e porosa das argamassas e o resultado da combinação dessas técnicas pode auxiliar na análise do comportamento do material. Cada uma das técnicas possui potencialidades e limitações, portanto sua combinação permitirá a descrição da microestrutura do material.

Vários outros estudos foram realizados usando a combinação dessas técnicas avançadas de caracterização, como μ -CT com DRX (Takahashi e Sugiyama, 2019; Artioli et al., 2010), μ -CT, FTIR e DRX (Kupwade-Patil et al., 2018). No entanto, o mais comum é a combinação de μ -CT e MEV (Elaqra et al., 2007; Gallucci et al., 2007; Thomas et al., 2018).

Na combinação entre MEV e μ -CT, a melhor resolução de MEV pode auxiliar na descrição das imagens geradas pela μ -CT e assim melhorar o entendimento e identificação dos parâmetros estudados, a combinação com o DRX e FTIR pode indicar a presença de componentes inorgânicos / orgânicos que não são vistos nas imagens.

2.5. Interface argamassa e substrato

A formação da interface argamassa/substrato é um fenómeno complexo. A interação entre os materiais envolve reações físico-químicas simultâneas, tais como: cinética de hidratação da argamassa, forma de aplicação, capacidade de absorção do substrato e as trocas com o ambiente (Costa e John, 2011).

O processo tem início quando a argamassa entra em contato com o substrato ainda no estado plástico. Fatores como a correta consistência por espalhamento da argamassa, que facilita a cobertura da superfície; forma de aplicação, que permite a compactação e redução do ar presente na interface; e a rugosidade do substrato, que se for elevada, pode afetar a aplicação,

e assim, aumentar a quantidade de defeitos na interface, prejudicando sua formação (Costa e John, 2011; Torres, 2014), vão influenciar o processo de adesão e a formação da interface.

O estudo da interface é relevante em relação ao desempenho do revestimento de argamassa em serviço. A aderência entre os materiais é uma característica importante, tendo em vista que dela vão depender a durabilidade e resistência à fendilhação (Torres, 2014).

Apesar da análise da aderência argamassa/substrato não ser o objetivo desta tese, pode haver alguma relação com ela. Então, torna-se importante compreender os fenômenos que ocorrem na interface.

A aderência é a união de duas fases por meio de uma interface, de forma ocorra a transferência de forças mecânicas. Esse contacto é regido por forças de Van der Waals, ligações químicas ou atração electrostática (Wu, 1982). A falta de contacto implica na falta de aderência (Antunes, 2005).

Um dos fatores importantes e que influenciam na adesão entre a argamassa e o substrato é a capacidade de absorção e retenção de água por parte do substrato (Palmer e Parsons, 1934). Assim, pode-se observar uma zona de transição, onde são identificados dois tipos de adesão, a química e a mecânica, isso ocorre nos sistemas cimentícios multifásicos (Costa e John, 2011).

A aderência química é definida como a capacidade de criação de ligações químicas (Nicot, 2008). Essas forças moleculares de atração podem ser primárias (covalentes) ou secundárias (Van de waals) (Reinhard, 1954). Porém, as ligações secundárias são as principais responsáveis pela aderência, devido às ligações químicas ocorridas entre a alvenaria e os produtos de hidratação do cimento. A ocorrência de ligações químicas tem sido constatada por alterações morfológicas dos produtos hidratados na zona da interface (Costa e John, 2011).

A adesão mecânica pode ser descrita como o potencial que existe na argamassa de penetrar nos poros do substrato (Nicot, 2008), e assim, percebe-se que as características superficiais do substrato influenciam neste tipo de adesão. Caso o substrato possua uma porosidade e/ou rugosidade tal que permita a penetração da base cimentícia, existem grandes possibilidades de ocorrer a adesão mecânica (Carvalho, 2005). Este fenômeno também pode ser explicado como

um sistema complexo envolvendo o transporte de material para a zona de transição, penetrando nos poros do substrato e em sequência da hidratação dos materiais cimentícios.

No caso de substratos cerâmicos, a utilização de chapisco para aumentar a rugosidade do substrato é uma prática comum (Costa e John, 2011) em argamassas convencionais. Este tipo de preparação da base resulta num aumento da aderência do conjunto (Scartezini, 2002).

Apesar de indícios da penetração da argamassa nos poros do substrato (Carasek, 1996; Carvalho, 2005), Costa et al. (2013) apontam que o potencial dessa penetração é pequeno, podendo não atingir 1% do volume de partículas totais da argamassa, o que indica que a adesão mecânica não é a única responsável pela aderência.

Esse volume de partículas da argamassa que pode penetrar no substrato depende da relação entre o diâmetro do poro e o diâmetro da partícula da argamassa. Se a razão entre os diâmetros estiver compreendida entre 10 e 20, ocorre o entupimento do poro (McDowell-Boyer et al., 1986).

A colaboração do poder de absorção do substrato está em diminuir a água contida na interface, propiciando a aproximação das partículas da argamassa. Assim, ocorre um aumento da quantidade de ligante e como consequência uma densificação da interface, tornando-a menos porosa (Costa e John, 2011; Lange et al., 1999). Porém, a absorção excessiva da água pode prejudicar a hidratação do ligante.

Para ocorrer a aderência adequada entre os materiais, a argamassa deve ocupar toda a superfície do substrato e possuir uma consistência por espalhamento adequada com boa distribuição de partículas da argamassa compatíveis com a rugosidade e porosidade do substrato (Costa e John, 2011).

A resistência adesiva do conjunto argamassa-substrato é então definida pelo sistema formado pela combinação das características da argamassa e do substrato. Entretanto, alguns fatores externos exercem influência nesse conjunto, tais como a eficiência da aplicação, a temperatura e umidade do ar. Esses fatores podem alterar o desempenho do conjunto, mesmo quando estes possuem as mesmas características (Recena, 2017).

A argamassa ao entrar em contacto com o substrato vai ter as suas características influenciadas pelo substrato, devido à absorção dos substratos e dos mecanismos responsáveis pela aderência. Apesar de todos os estudos realizados sobre a aderência argamassa/substrato, existe a lacuna no conhecimento das alterações provocadas nas características da argamassa (Torres, 2014).

O conhecimento do comportamento dos materiais possibilita o estabelecimento de parâmetros e recomendações aos profissionais envolvidos na sua utilização. Compreender a interação do conjunto argamassa/substrato, as condições de preparação, aplicação e cura são fundamentais para execução de revestimentos de argamassa seguros, sustentáveis e com desempenho adequado.

2.6. Influência do substrato nas características da argamassa aplicada

A maior parte da investigação desenvolvida, tem sido referente à caracterização, incorporação de novos materiais, características de desempenho e análise de fatores que podem influenciar a adesão entre substrato e argamassa.

Ainda que alguns autores tenham realizado estudos sobre a interface argamassa/substrato e dos fatores que influenciam na adesão do conjunto (Moropoulou et al., 2000; Barroso e Cruz, 1998; Carvalho, 2005), percebe-se ainda uma lacuna relacionada com a alteração das características mecânicas e físicas da argamassa após a aplicação no substrato.

Alguns estudos já foram realizados, com o principal objetivo de fazer uma análise qualitativa da influência de fatores nas características das argamassas aplicadas, mas não esgotaram o tema.

Carasek (1996) avaliou as ligações substrato/argamassa com diferentes teores de humidade e diferentes argamassas. Para isso, realizou ensaios de arrancamento conjuntamente com observações com a lupa binocular e microscópio eletrónico de varrimento, concluindo que os fatores analisados, como o aumento do teor de cimento da argamassa e a molhabilidade dos substratos, influenciam na aderência.

Carvalho (2005) Avaliou o sistema argamassa / substrato no que diz respeito à aderência com o auxílio do microscópio eletrónico de varrimento (MEV-EDS) e do espectrómetro de fluorescência de raios-X e procurou relacionar as análises microestruturais com as propriedades

macro de resistência à aderência. Concluiu que o teor de cimento e a capacidade de penetração da pasta estão relacionados com a aderência.

Muller (2010) estudou a influência da camada de chapisco na adesão da argamassa ao substrato, com três tipos de chapisco e três tipos de cura, concluindo que o melhor desempenho foi atingido com o chapisco rolado.

Kazmierczak et. al (2007) utilizaram três substratos e uma argamassa industrializada, concluindo que o tipo de substrato influencia a distribuição dos poros e a adesão da argamassa. Foi utilizada a porosimetria de intrusão de mercúrio na análise. A distribuição de poros da argamassa endurecida, entretanto, variou em função das características de cada substrato utilizado, principalmente naqueles em que foi utilizado chapisco.

Torres et al. (2018) utilizaram três substratos (tijolo, betão e acrílico), três tipos de argamassas (argamassa de cimento, argamassa de cal aérea e argamassa de cimento pré – doseada), com um tipo de traço para cada argamassa e avaliaram parâmetros como a porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão, concluindo que a aplicação de argamassas em substratos porosos acarreta na redução da porosidade aberta, e essa diminuição influenciou as outras características estudadas, melhorando as características mecânicas e reduzindo a absorção de água por capilaridade.

O projeto de investigação IF MORTAR, no qual esta tese de doutoramento está inserida, procurou atuar nessa lacuna e estudou a influência do substrato nas características da argamassa aplicada.

Para isso, estudaram-se os substratos de tijolo furado, tijolo maciço, bloco de betão, bloco de betão leve e placa de betão com as argamassas de cimento tradicional e pré-doseada, cal hidráulica tradicional e pré-doseada, cal aérea tradicional e pré-doseada.

Torres et al. (2019) estudaram a influência do substrato nas características mecânicas das argamassas. Para isso, utilizaram os substratos de tijolo cerâmico furado e bloco de betão e as argamassas de cimento, cal hidráulica e aérea. A conclusão daquele estudo foi que ocorre o aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico da argamassa

aplicada em relação à argamassa produzida no molde metálico. Esse aumento é mais significativo na argamassa tradicional aplicada a substratos mais porosos e absorventes e que a utilização de chapisco e o humedecimento do substrato melhoram a resistência adesiva.

O estudo de Silveira et al. (2019) teve como objetivo avaliar a influência tipo de substrato (tijolo cerâmico e placa de betão), número de camadas (uma, duas e três) no desempenho físico e mecânico da argamassa de cimento tradicional e industrializada. Foi concluído que o substrato influencia o desempenho das argamassas. As argamassas aplicadas no substrato de tijolo cerâmico (mais poroso que o substrato de betão) tendem a apresentar maior dureza e compacidade superficial e menor permeabilidade à água líquida. A influência do número de camadas de argamassa foi evidente na absorção de água sob baixa pressão, com corpos de prova multicamadas apresentando menor permeabilidade à água líquida. Sobre a influência da espessura da camada (argamassa monocamada), foi identificada uma tendência para modelos com camadas de argamassa mais finas apresentarem maior compacidade e menor permeabilidade à água líquida.

Silveira et al. (2020) analisaram a influência física e mecânica do bloco de betão leve nas características da argamassa de cimento. Como conclusão, foi observada uma pequena diferença entre a argamassa endurecida no substrato e a argamassa endurecida em moldes normalizados. Porém não foi claro que essa diferença tenha sido relacionada com substrato. Foi possível observar naquele estudo que a argamassa aplicada no bloco de betão leve ficou levemente mais compacta, com menor porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água. Por outro lado, a resistência à compressão da argamassa aplicada foi inferior à da argamassa endurecida no molde.

Travincas et al. (2020) estudaram a interface substrato/argamassa por meio de técnicas avançadas de caracterização. Para isso, analisaram uma argamassa tradicional de cimento aplicada ao tijolo cerâmico furado no estado endurecido aos 7, 14 e 28 dias de cura. A análise foi realizada por meio dos ensaios de μ CT, DRX e MEV com EDS. Os autores concluíram que na região da interface, é possível observar uma variabilidade em termos de granulometria e proporção de ligante, o que determina diversos padrões microestruturais e a consequente qualidade da aderência. O padrão que proporciona ligações mais fortes caracteriza-se pela

presença de poros tendencialmente esféricos numa matriz muito fina. Também foi possível verificar anisotropias causadas forma de aplicação que resultou numa orientação dos poros da argamassa.

Pereira et al. (2020) estudaram a interface argamassa/substrato com a utilização de μ CT, DRX e MEV. Para isso, analisaram duas argamassas (cal hidráulica e cimento) aplicadas nos substratos de tijolo cerâmico furado, placa de betão e bloco de betão leve. Os autores concluíram que ocorrem diferentes arranjos microestruturais na interface (poro canal, poros mistos e canais interpartículas) que se relacionam com a aderência. Também foi observado que um melhor desempenho do tijolo cerâmico furado atribuído ao maior poder de absorção do substrato.

Travincas et al. (2020) investigaram também a interface substrato/argamassa por meio de técnicas avançadas de caracterização. Para isso, analisaram uma argamassa de cimento aplicada no substrato de tijolo cerâmico furado aos 7, 14 e 28 dias de cura. O estudo concluiu que a forma de aplicação da argamassa no tijolo pode gerar anisotropias de compactação/distribuição de partículas, criando defeitos locais estruturais significativos que se propagam até à interface. Foi possível observar diferentes arranjos microestruturais na interface e o padrão que proporciona ligações mais fortes caracteriza-se pela presença de poros tendencialmente esféricos numa matriz muito fina.

Silveira et al. (2021) estudaram a influência do substrato tijolo cerâmico maciço no desempenho da argamassa de cal hidráulica produzida com duas granulometrias distintas (fina e comum). Com a investigação realizada foi possível concluir que o substrato influencia no comportamento das argamassas de cal hidráulica. A sucção exercida pelo substrato poroso sobre a argamassa aplicada, que leva ao aperto dos poros, deve ser um fator importante que ajuda a explicar as mudanças no comportamento das argamassas após a aplicação nos substratos. De facto, ao comparar as características das argamassas endurecidas e destacadas dos substratos e das argamassas endurecidas nos moldes normalizados, verificou-se que a porosidade aberta, a absorção de água por capilaridade e a permeabilidade ao vapor de água das argamassas analisadas diminuíram. Em relação à resistência à compressão, no entanto, as argamassas formuladas com os dois tipos de areia (fina e comum), apresentaram tendências diferentes.

Silveira et al. (2021) estudaram também a influência do substrato e do número e espessura de camadas no desempenho físico e mecânico da argamassa por meio de testes *in situ*. Para isso, foram utilizados tubos de *Karsten*, esclerómetro pendular e ultrassons. O estudo concluiu que o substrato de tijolo cerâmico (mais poroso que o substrato de betão) tende a apresentar maior resistência mecânica, maior compacidade superficial e menor permeabilidade à água líquida.

Bellei et al. (2021) investigaram a influência do tijolo cerâmico furado na argamassa de cimento produzida com duas granulometrias diferentes (comum e fina), concluindo que a granulometria do agregado influencia nas propriedades das argamassas. A argamassa produzida com areia comum apresentou o melhor desempenho na maioria dos casos. A areia fina contribuiu para a diminuição da massa volúmica, aumento da porosidade aberta e do coeficiente de capilaridade da argamassa e diminuição da resistência à compressão. Em relação à influência do substrato, a massa volúmica e a resistência à compressão aumentaram, em relação à absorção por capilaridade da argamassa não ocorreram diferenças significativas entre a argamassa endurecida no substrato e a argamassa endurecida no molde normalizado.

Matias et al. (2021) investigaram a influência de diversos substratos na distribuição dos poros da argamassa de cal hidráulica aplicada. Para isso, foi utilizado o porosímetro por intrusão de mercúrio. Os resultados obtidos permitiram concluir que as propriedades do substrato induzem alterações na argamassa no que diz respeito à quantidade de poros, distribuição do tamanho dos poros e à densidade aparente da argamassa. Foi possível observar que, à medida que as propriedades de porosidade do substrato se aproximam das propriedades da argamassa, menos se altera a estrutura porosa da argamassa. Diante disso, o substrato de tijolo cerâmico furado, placa de betão e pedra natural parecem ser os de menor impacto na porosimetria da argamassa de cal hidráulica.

Gouveia (2021) estudou a influência de diversos substratos (tijolo cerâmico furado e maciço, bloco de betão, placa de betão e bloco de betão leve) nas características de uma argamassa industrializada de cal hidráulica. Como conclusão, verificou que a massa volúmica aumentou, a porosidade aberta reduziu, a absorção por capilaridade aumentou, o índice de secagem aumentou e a resistência à compressão aumentou quando se compara a argamassa endurecida no molde metálico com a argamassa endurecida nos substratos. Também foi realizado o

envelhecimento acelerado da argamassa aplicada nos substratos, mas não foi possível observar uma tendência dos resultados.

Soares (2021) investigou a influência dos substratos (tijolo cerâmico maciço e pedra natural) no comportamento das argamassas de cal hidráulica e aérea. Concluiu-se que a caracterização das argamassas em moldes laboratoriais conduz à obtenção de resultados diferentes da caracterização das argamassas após aplicadas nos substratos. Pôde-se verificar que o substrato com maior porosidade aberta e com dimensão de poros maiores, neste caso, o tijolo cerâmico maciço, teve relevante influência nas propriedades das argamassas, no que se refere à porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e índice de secagem.

2.7. Algoritmos de aprendizagem de máquina aplicados ao estudo de argamassas

A aprendizagem de máquina é uma abordagem de dados que usa conceitos estatísticos para criar um modelo matemático com as informações existentes, e assim, tomar decisões sobre dados futuros (Saha e Barai, 2020).

Com o aumento da geração de dados na caracterização de materiais, a ciência de dados surgiu com ferramentas que possibilitam a exploração desses grandes conjuntos gerados. Deste modo, é facilitada a mineração e o processamento de grandes conjuntos de informação (Koumoulos et al., 2019).

Essa possibilidade de previsão na caracterização dos materiais reduz o risco da tomada de decisão e possibilita a percepção de falhas e acertos (Koumoulos et al., 2019). Portanto, uma previsão da vida útil de um material pode minimizar a progressão dos danos, por exemplo, em relação aos custos de manutenção (Mishra, 2020).

Houve avanços não apenas na caracterização do material, mas em tecnologias de inteligência artificial que têm sido utilizadas na construção e geração de resíduos (Cha et al., 2020) estimando as propriedades dos materiais *in situ* para avaliar e tratar da execução, conservação e manutenção de edifícios (Moris e Glisic, 2020), sendo uma ferramenta promissora na tomada de decisões, incluindo o planejamento da manutenção predial (Tran e Hoang, 2017).

Sendo assim, a aprendizagem de máquina é um ramo da inteligência artificial (IA) focada em ensinar computadores a fazer previsões a partir de conjuntos de dados e algoritmos disponíveis. Permite aos sistemas computacionais desenvolverem a habilidade de aprender e se aprimorar, em vez de serem explicitamente programados (Thai, 2022).

Em geral, a aprendizagem de máquina pode ser dividida em três categorias principais com base no processo de aprendizagem: aprendizagem supervisionada, aprendizagem não supervisionada e aprendizagem por reforço (Thai, 2022; Nunez et al., 2021).

A aprendizagem supervisionada é o tipo mais simples de aprendizagem de máquina no qual os algoritmos são treinados em conjuntos de dados rotulados. Este método é adequado para problemas de regressão e classificação. Por outro lado, os algoritmos usados na aprendizagem não supervisionada são treinados em conjuntos de dados não rotulados. Enquanto no método de aprendizagem por reforço, o tipo menos comum, o algoritmo é treinado por tentativa e erro (Thai, 2022; Nunez et al., 2021).

O principal tipo de aprendizagem utilizado em problemas de engenharia civil é a aprendizagem supervisionada (Xu et al., 2021; Chaabene et al., 2020; Mishra, 2020). A figura 2.1 ilustra os principais algoritmos de aprendizagem supervisionada para problemas de regressão e classificação (Nunez et al., 2021; Thai, 2022; Jain et al., 2022).

A principal diferença entre problemas de regressão e classificação encontra-se na variável de resposta. Para classificação a variável de resposta é categórica e procura identificar padrões. Para problemas de regressão a variável de resposta é numérica e procura-se estimar uma função de regressão (Sun et al., 2020; Izbicki e Santos, 2020).

De forma geral, a construção de algoritmos de aprendizagem de máquina é dividida em: treinamento, validação e teste (Chaabene et al., 2020) (figura 2.2). Como primeiro passo é importante que a base de dados seja dividida de forma aleatória em treino e teste. Então é realizada a avaliação de performance do algoritmo (Thai, 2020).

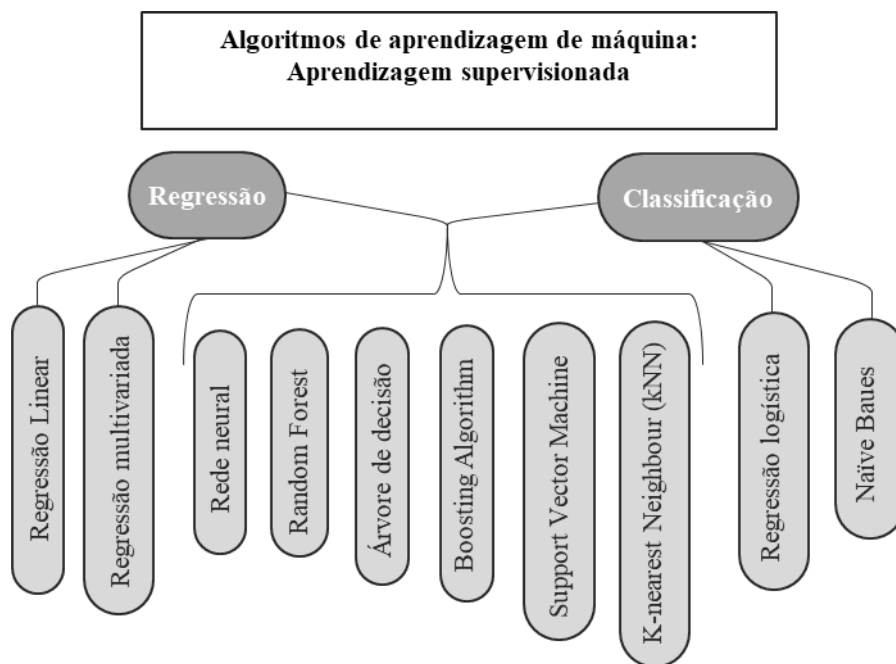


Figura 2.1 Principais algoritmos de aprendizagem de supervisionada

Uma técnica eficiente para essa avaliação de performance é a validação cruzada (k-fold). A validação cruzada divide de forma aleatória a base de dados em K partes e treina o modelo K vezes utilizando uma das partes como teste e as demais com treino (Sun, 2020). É importante que diferentes algoritmos sejam comparados com o objetivo de encontrar o algoritmo mais adequado para o problema em questão (Thai, 2022).

Com o modelo treinado é avaliada a performance do algoritmo com a base de dados separada para teste (Mishra, 2020). Então, pode ser realizada a previsão com a utilização de uma nova base de dados.

As principais métricas de avaliação dos modelos de regressão são (Chaabene et al., 2020; Sun, 2020; Izbicki e Santos, 2020):

- **MAE** (erro absoluto médio) representa a diferença entre os valores originais e previstos extraídos pela média da diferença absoluta sobre o conjunto de dados.
- **MSE** (erro quadrático médio) representa a diferença entre os valores originais e previstos extraídos pelo quadrado da diferença média sobre o conjunto de dados.

- **RMSE** (Raiz do erro quadrático médio) é a taxa de erro pela raiz quadrada de MSE.
- **R²** (coeficiente de determinação) representa o coeficiente de quão bem os valores se ajustam em comparação com os valores originais. Os valores variam de 0 a 1. Quanto mais alto for o valor, melhor será o modelo.

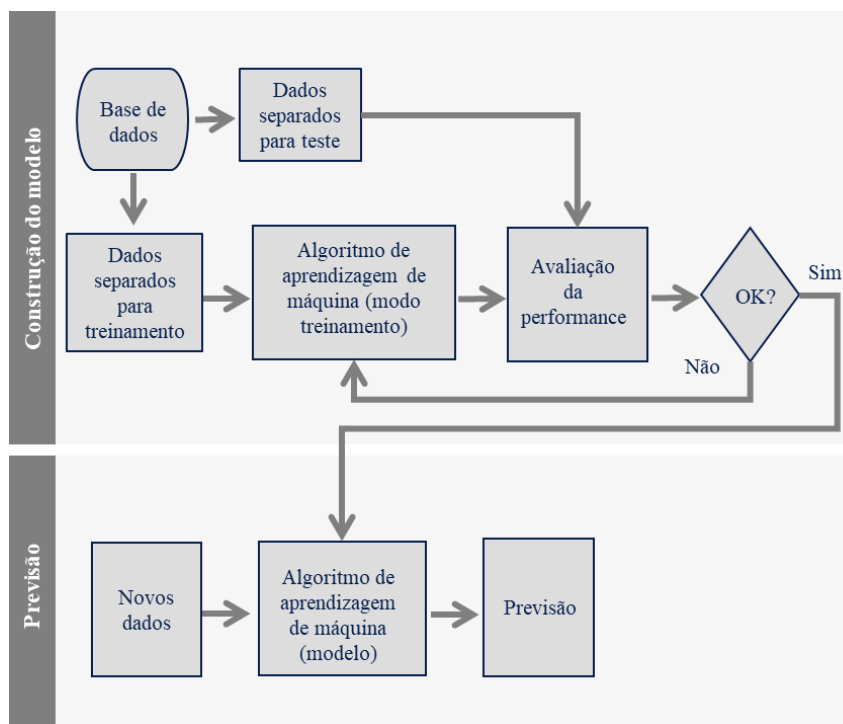


Figura 2.2 Fluxo de construção de algoritmos de aprendizagem de máquina (adaptado de Thai, 2021)

Para os modelos de classificação, temos as seguintes métricas de avaliação (Sun, 2020; Izbicki e Santos, 2020):

- **AUC** (Área sob a curva ROC) é a área sob a curva de operação do recetor, é a área sob a curva formada pelo gráfico entre a taxa de registos positivos, que são positivos (TP) e a taxa de falsos positivos (FP);
- **CA** (Acurácia) é a percentagem de amostras corretamente classificados, é a divisão de todos os registos classificados corretamente pelo total;
- **Precisão** é a proporção de verdadeiros positivos (TP) entre as instâncias classificadas como positivas (TP + FP);

- **Sensibilidade** é a proporção de verdadeiros positivos (TP) entre todas as instâncias positivas nos dados (TP + FN);
- **F1** é a média harmônica entre precisão e sensibilidade;
- **Matriz** de confusão que fornece a proporção de instâncias entre a classe prevista e a real, cada linha da matriz representa a classificação correta e as colunas a classificação prevista.

Algumas investigações têm usado algoritmos de aprendizagem de máquina no contexto das argamassas.

Saha et al. (2020) utilizaram o modelo de regressão logística para segmentar imagens obtidas por meio da microtomografia de raios-X para detectar com precisão os agregados e a matriz da argamassa. Xu et al. (2021) também usaram a aprendizagem de máquina, com o algoritmo *Random Forest*, na segmentação de imagens μ CT.

Tran e Hoang (2017) propuseram um modelo de aprendizagem de máquina híbrido baseado em regressão vetorial de suporte de mínimos quadrados, otimizado pelo algoritmo de polinização de flores. Utilizaram esse modelo para estimar o tempo de crescimento de algas na superfície da argamassa. Apesar do resultado satisfatório, as condições controladas obtidas em laboratório limitam a generalização e aplicabilidade da predição.

Sevim et al. (2021) propuseram um modelo para prever a resistência à compressão de amostras de argamassa com diferentes propriedades. Para isso, empregaram oito diferentes cinzas volantes na pesquisa. Utilizaram algoritmos de redes neurais artificiais e inferência *Fuzzy*. Asteris et al. (2021) estudaram a aplicabilidade de algoritmos de aprendizagem de máquina, como o *Support Vector Machine*, *Random Forest*, árvore de decisão, AdaBoost e *K-nearest Neighbors*. Neste estudo, foi analisada a resistência à compressão de argamassas, obtendo maior precisão com o AdaBoost e *Random Forest*.

Cha et al. (2020) utilizaram o algoritmo *Random Forest* para prever resíduos de demolição, obtendo um alto desempenho para um pequeno conjunto de dados.

Oey et al. (2020) usaram algoritmos de árvore de decisão para prever o comportamento mecânico (resistência à compressão) de sistemas cimentícios. Foram avaliados os efeitos das

características do cimento Portland nas propriedades e desempenho de pastas de cimento e argamassas.

Mishra et al. (2019) usaram o algoritmo *Support Vector Machine* para prever a resistência à compressão de alvenaria de tijolo-argamassa, concluindo que o modelo construído com o SVM é consistente e levou a resultados de previsão satisfatórios.

Hoang et al. (2017) usaram a Programação Genética *Multi-Gene* e as *Splines* de Regressão Adaptativa Multivariada para construir equações de predição de difusão de íon cloreto em argamassas de cimento. Wu e Liu (2020) estabeleceram modelos preditivos usando o algoritmo de regressão vetorial de suporte otimizado (BO-SVR). Com isso, foi possível prever a variação de massa e resistência à compressão de argamassas sob ataque com ácido sulfúrico.

Existe uma ampla gama de possibilidades de aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina na área de argamassas. No entanto, esses estudos ainda são escassos, principalmente quando comparados com outras áreas da ciência.

A utilização de algoritmos de aprendizado de máquina em argamassas pode auxiliar na compreensão do material a ser estudado de forma completa e este fato permite prever comportamentos e propriedades. Isto pode abrir um novo espectro no desenvolvimento e otimização, não só de materiais existentes, mas na criação de novos e mais sustentáveis produtos.

Os principais algoritmos utilizados no contexto das argamassas são:

- *Artificial Neural Network (ANN)*
- *Random Forest (RF)*
- *Support Vector Machine (SVM)*

O algoritmo *Random Forest (RF)*, desenvolvido por Breiman em 2001 (Breiman, L, 2001), pode ser definido como um conjunto de árvores de decisão estruturadas (classificação e/ou regressão). Cada árvore cresce aleatoriamente de acordo com um subgrupo do conjunto de treinamento, com reposição. Portanto, a amostra selecionada não é excluída do conjunto de dados, portanto, algumas amostras podem ser especificadas várias vezes, enquanto outras não

serão selecionadas num novo conjunto. Estar com substituição melhora a precisão, reduzindo a variância dos erros de classificação. (Asteris et al., 2021). Assim, no *Random Forest*, cada árvore de decisão equivale a um voto em uma classe, e a classificação final é o resultado da maioria dos votos (Mendes et al., 2018).

A Rede Neural Artificial (*ANN*) é um algoritmo inspirado em neurônios biológicos, onde a informação é processada e transmitida em forma de rede (Braga et al., 2007). Este método, entre as melhores técnicas de inteligência artificial, oferece algumas vantagens. Uma delas é a identificação de relações entre variáveis dependentes e independentes por meio de conexões não lineares entre elas e a possibilidade de criação rápida de modelos eficazes (Sevim et al., 2021). De certa forma, a rede neural é estruturada em camadas de neurônios (camada de entrada, camada intermediária e camada de saída) com conexões entre eles (Cosenza et al., 2015). Essa divisão por camadas forma a base do modelo (figura 2.3). Enquanto as variáveis independentes estão nos neurônios da camada de entrada, o processamento das operações matemáticas é realizado nas camadas ocultas e de saída (Sevim et al., 2021). Durante o treino, um processo iterativo é realizado para minimizar os erros associados aos valores estimados, reajustando os parâmetros dos neurônios da rede (Cosenza et al., 2015).

O *Support Vector Machine (SVM)* foi desenvolvida por Cortes e Vapnik (Cortes e Vapnik 1995) e pode lidar com problemas de classificação e regressão (Ray, 2019). O SVM é uma ferramenta eficaz de reconhecimento de padrões. O método é adequado para casos com tamanho amostral pequeno (Mishra et al., 2019).

Neste método, um hiperplano precisa ser definido; este é o limite de decisão. Ao ter um conjunto de objetos que pertencem a classes diferentes, há a necessidade de um plano de decisão para separá-los (Ray, 2019). Em seguida, os vetores de suporte modificam os dados originais de entrada de baixa dimensão em dados de saída de alta dimensão por meio de transformação não linear. Essa transformação permite a separação não linear de recursos que não podem ser reconhecidos em um espaço de baixa dimensão (Mishra et al., 2019). Nesse sistema, os vetores de suporte são pontos posicionados mais próximos do hiperplano ideal (Asteris et al., 2021).

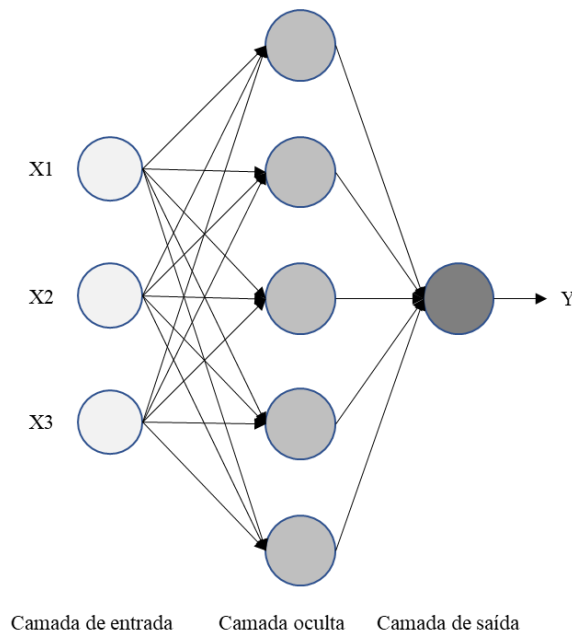


Figura 2.3 Estrutura do modelo de rede neural artificial

Uma das vantagens da utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina é o suporte ao processo de tomada de decisão, considerando seu caráter preditivo e poder de classificação e generalização. Por outro lado, uma das desvantagens é a necessidade de um grande volume de dados para superar o “*overfitting*” dos dados, onde o algoritmo simplesmente codifica peculiaridades aleatórias dos dados (Domingos, 2012). A tabela 2.3 resume a utilização dos algoritmos de aprendizagem de máquina em argamassas.

Tabela 2.3 Utilização de algoritmo de aprendizagem em argamassa

Tema	Referências
Segmentação de imagens	Saha, et al. (2020); Xu et al. (2021)
Resistência à compressão	Sevim et al. (2021); Asteris et al. (2021); Oey et al. (2020), Wu and Liu (2020), Mishra et al. (2019)
Crescimento de algas na superfície da argamassa	Tran and Hoang (2017)
Resíduo de demolição	Cha et al. (2020)

2.8. Síntese do capítulo

Este capítulo é relativo ao estado da arte da tese e procura fornecer os elementos necessários para a compreensão do trabalho desenvolvidos.

As argamassas formuladas para o revestimento das edificações possuem aplicação global. Este sistema de revestimento funciona como uma barreira inicial de proteção, e possui uma importância fundamental no desempenho do conjunto edificado.

Para um bom desempenho da argamassa de revestimento, espera-se que a argamassa tenha baixa absorção de água por capilaridade, boa permeabilidade ao vapor de água, boas condições de aderência ao substrato, resistência mecânica adequada e elevada capacidade de deformação.

Porém, essas características são interligadas o que torna difícil dosear uma argamassa de revestimento. Para se obter uma boa trabalhabilidade, boa aderência ao substrato e boa compacidade, é necessária uma argamassa com alto teor de ligante, mas por outro lado, uma argamassa com alto teor de ligante apresenta forte tendência à fissuração por retração. Contudo, se for reduzida a quantidade de ligante, a retração diminui, resultando uma argamassa com maior porosidade e assim, não impermeável o suficiente, com pouca aderência ao substrato e redução da trabalhabilidade.

Para determinar essas propriedades da argamassa, são executados ensaios em condições controladas de laboratório com procedimentos estabelecidos em normas. Porém, as condições em serviço são diferentes e fatores como o substrato onde a argamassa será aplicada não é considerado.

Entretanto, alguns autores vêm estudando a influência exercida pelo substrato no desempenho da argamassa. Apesar da maioria desses estudos estarem relacionados a aderência do conjunto, o projeto IF MORTAR estudou essa influência um pouco mais a fundo. Com isso, pôde-se perceber que a maior influência do substrato é na porosidade aberta da argamassa que acaba por controlar todo seu desempenho.

Em relação às previsões de características da argamassa, pôde-se perceber o avanço da utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina no âmbito desta temática. Esses

algoritmos possuem diferentes tipos de aprendizagem, porém o mais comum é o aprendizado supervisionado.

Os algoritmos de aprendizagem supervisionado podem ser como objetivo a previsão de parâmetros quantitativos (regressão) ou qualitativos (classificação) e os principais algoritmos utilizados são: Rede neural artificial, *Random Forest* e *Support Vector Machine*.

O próximo capítulo é destinado à metodologia da tese e os procedimentos de ensaio.

3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.1 Introdução

3.2 Fases de caracterização

3.3 Procedimentos de ensaio

3.4 Síntese do capítulo

3. Metodologia e procedimentos de ensaio

3.1. Introdução

O principal objetivo deste trabalho é analisar a influência do substrato nas características de uma argamassa industrial. Para isso, é necessário realizar a comparação das características físicas e mecânicas da argamassa endurecida em moldes laboratoriais normalizados com as mesmas características da argamassa endurecida, após aplicação em diversos tipos de substratos, e posteriormente destacada.

O objetivo do presente capítulo é apresentar a metodologia seguida no desenvolvimento das campanhas experimentais e os respectivos procedimentos de ensaio de caracterização.

As campanhas experimentais decorreram entre setembro de 2019 e dezembro de 2021 e foram executadas nos laboratórios do Itecons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade e nos laboratórios do DECivil, Instituto Superior Técnico.

A metodologia da investigação consistiu em extensas campanhas experimentais divididas em 7 fases. A fase 1 foi dedicada à caracterização dos substratos; a fase 2 foi relativa à caracterização da argamassa no estado fresco e endurecida em moldes normalizados; as fases 3, 4 e 5 foram dedicadas à caracterização da argamassa endurecida nos substratos com diferentes tipos de cura; a fase 6 foi dedicada a análise estatística dos dados obtidos nas campanhas experimentais executadas nas fases anteriores; e na fase 7, com os resultados obtidos, foi realizada a previsão das características do substrato mais adequado, por meio de algoritmos de aprendizagem de máquina. Foram ainda realizadas campanhas preliminares para ajustes dos procedimentos de ensaios. A figura 3.1 ilustra as fases seguidas no desenvolvimento do trabalho.

Foi selecionado um tipo de argamassa industrial à base de cimento, de uso geral, compatível com diversos substratos, que pode ser aplicada manualmente ou por projeção, adequada para uso interior e/ou exterior e possui em sua composição cimento, agregados de granulometria compensada, adjuvantes e fibras sintéticas.

A argamassa utilizada possui elevada disponibilidade no mercado e apresenta as seguintes características, obtidas em ensaios realizados em condições normalizadas, de acordo com o fabricante:

- Massa volúmica do produto endurecido: 1400 a 1500 kg/m³
- Resistência à compressão: > 1,35 N/mm²
- Resistência à flexão: > 0,75 N/mm²
- Retração: <0,9 mm/m
- Aderência: 0,25 N/mm²
- Permeabilidade ao vapor de água (μ): 35
- Absorção de água: Wc (0)

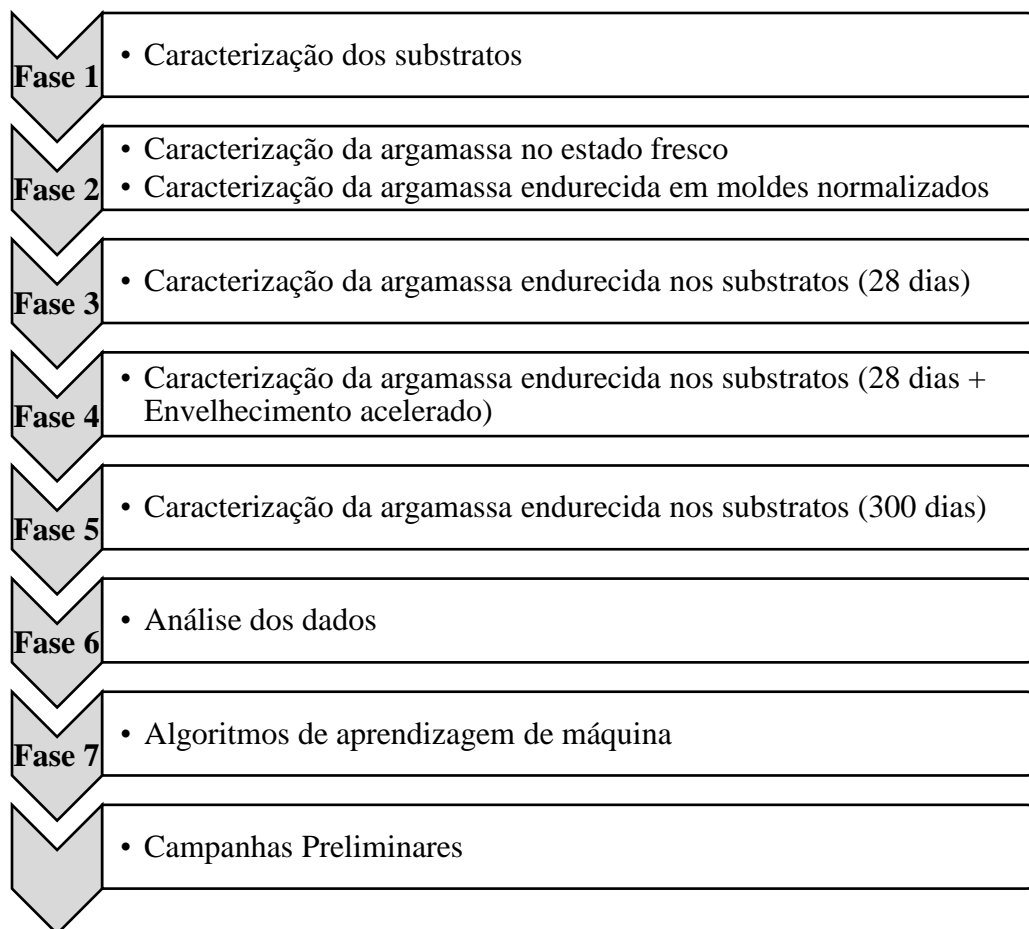


Figura 3.1 Fases de desenvolvimento do trabalho

Em relação aos substratos, foram selecionados os seguintes (figura 3.2):

- Tijolo cerâmico furado (300 x 200 x 70 mm³);
- Tijolo cerâmico maciço corrente (215 x 110 x 55 mm³);
- Bloco de betão (500 x 200 x 100 mm³);
- Bloco de betão leve (500 x 200 x 100 mm³);
- Placa de betão (300 x 200 x 40 mm³).

Estes substratos foram selecionados pela sua corrente utilização na indústria da construção, pelas diferentes características e indicação de compatibilidade pelo fabricante da argamassa.

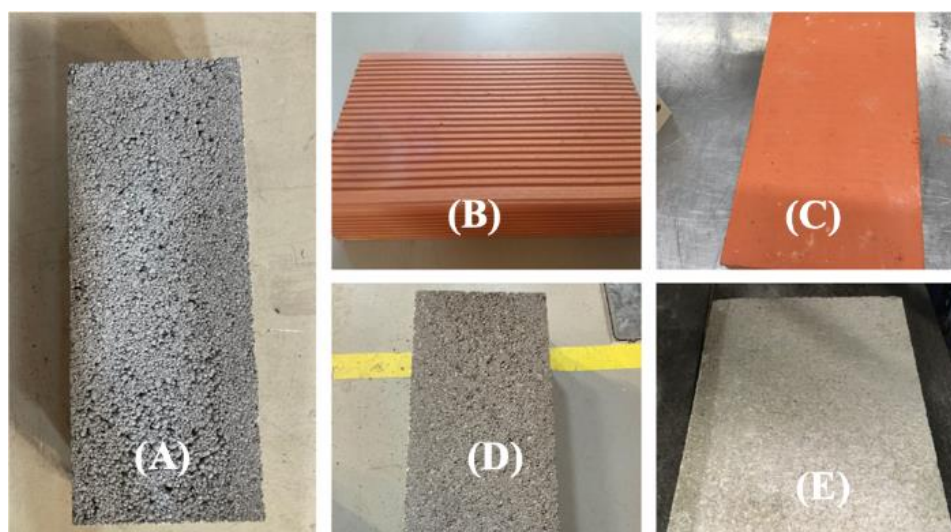


Figura 3.2 Substratos utilizados - (A) Bloco de betão leve; (B) Tijolo cerâmico furado; (C) Tijolo cerâmico maciço; (D) Bloco de betão; (E) Placa de betão.

Em relação à preparação dos substratos, o fabricante recomenda que estejam planos, estáveis, resistentes, limpos e sem buracos. O humedecimento prévio é recomendado em casos de condições de calor, como não será o caso, os substratos não foram humedecidos previamente.

Para efetuar a comparação das características das argamassas, de uma forma mais rigorosa, existiu a necessidade de compatibilizar geometricamente as dimensões dos provetes obtidos. Tendo em vista que as argamassas endurecidas nos moldes normalizados, possuem as dimensões de 40 x 40 x 160 mm³ e as argamassas endurecidas no substrato, que possuem uma espessura de 15 mm, foram cortadas em quadrados de 40 x 40 mm², as argamassas endurecidas

nos moldes normalizados foram cortadas com a espessura de 15 mm, ficando todos os provetes com as dimensões de 40 x 40 x 15 mm³, com o objetivo de evitar a influência da geometria na análise da comparação dos resultados. Esta metodologia de compatibilização também foi utilizada por Torres et al. (2018). A figura 3.3 ilustra o esquema de compatibilização dos provetes.

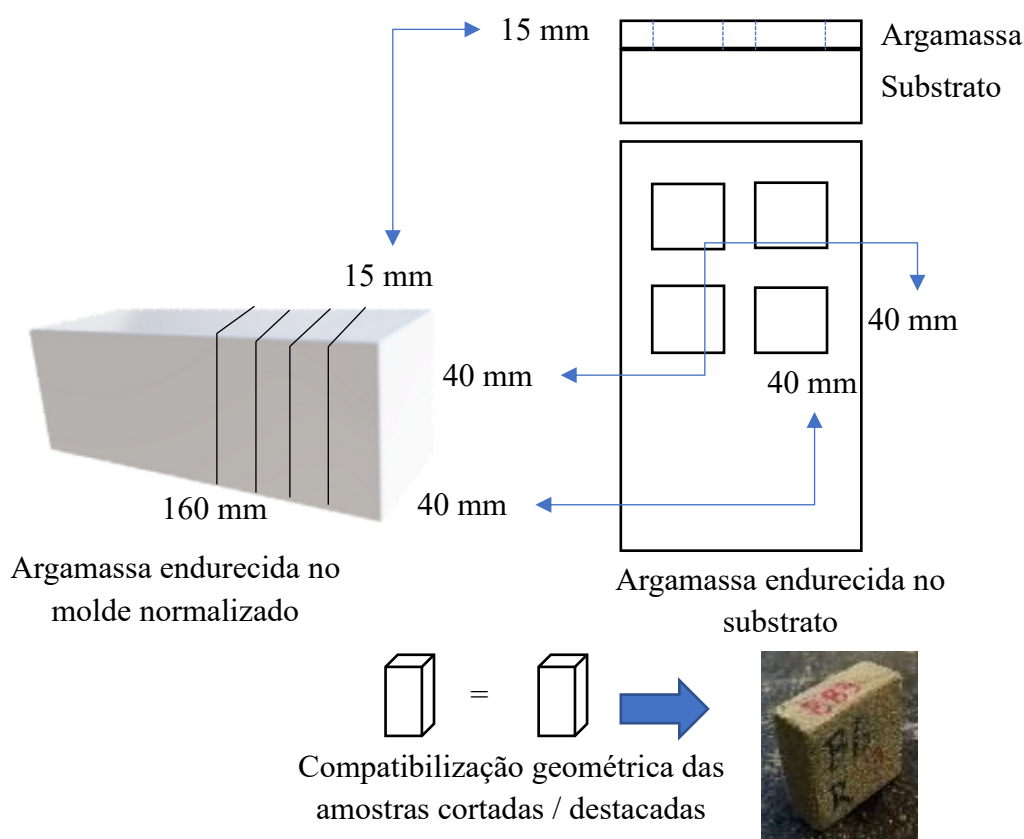


Figura 3.3 Esquema de compatibilização dos provetes

Além da caracterização com provetes compatibilizados, a argamassa também foi caracterizada, de acordo com as normas, utilizando os provetes prismáticos (40 x 40 x 160 mm³).

Para atingir o objetivo proposto foram então executados ensaios de caracterização física, mecânica, *in situ* e microestrutural. Na execução dos ensaios procurou-se utilizar o mesmo procedimento para as caracterizações dos substratos, argamassas endurecidas no molde normalizado e argamassas endurecidas e destacadas dos substratos.

Ressalta-se a necessidade de adaptação das normas em função das dimensões das amostras, a tabela 3.1 resume os ensaios efetuados e a quantidade total de amostras ensaiadas para cada caso.

Para facilitar o destacamento da argamassa aplicada dos substratos, foi introduzida uma malha de fibra de vidro na interface argamassa/substrato. A malha utilizada possui as seguintes características: resistente à alcalinidade, abertura de tela de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ e massa específica de 158 g/m^2 .

Em relação à utilização da malha de fibra de vidro, foram realizadas campanhas preliminares que demonstraram que a malha não influencia significativamente as características da argamassa aplicada (Travincas et al., 2022) e sua utilização aumenta o aproveitamento das amostras destacadas.

A figura 3.4 ilustra a malha de fibra de vidro (A) e seu posicionamento (B). No caso dos ensaios onde não havia a necessidade de destacar a argamassa dos substratos (técnicas de caracterização in situ e análise microestrutural), não foi utilizado o recurso do posicionamento da rede na interface argamassa/substrato.

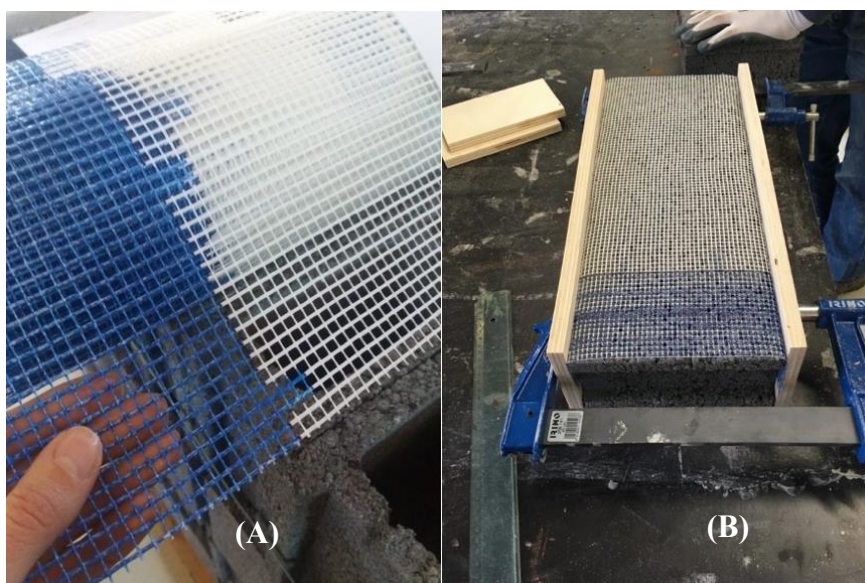


Figura 3.4 Malha de fibra de vidro - (A) Abertura da malha; (B) Posicionamento da malha na interface

Tabela 3.1 Ensaios realizados e total de provetes ensaiados por ensaio

Argamassa / Substrato	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Argamassa estado fresco	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Substratos	-	-	-	30	-	39	39	27	5	-	-	-	-	-	5	-	-
Molde prismático (40 x 40 x 160 mm ³)	-	-	3	5	5					15	4	-	3	-			
Molde prismático compatibilizado e argamassa destacada dos substratos (40 X 40 X 15 mm ³)						23	24	4	1						1	1	1
	-	-	-	22	21					23	-	-		-			
Argamassa destacada dos substratos aos 28 dias de cura (40 X 40 X 15 mm ³)	-	-	-	208	207	203	203	24	5	204	-	28	10	10	5	5	5
Argamassa destacada dos substratos aos 28 dias de cura e envelhecimento acelerado (40 X 40 X 15 mm ³)	-	-	-	50	48	48	49	27	5	48	-	28	10	10	-	-	-
Argamassa destacada dos substratos aos 300 dias de cura (40 X 40 X 15 mm ³)	-	-	-	49	48	48	48	21	5	38	-	30	10	10	-	-	-

(A) Consistência por espalhamento; (B) Massa volúmica aparente - estado fresco; (C) Módulo de elasticidade dinâmico; (D) Coeficiente de absorção por capilaridade; (E) Índice de Secagem; (F) Porosidade aberta; (G) Massa volúmica; (H) Permeabilidade ao vapor de água; (I) Porosimetria por intrusão de mercúrio; (J) Resistência à compressão; (K) Resistência à tração por flexão; (L) Resistência adesiva; (M) Velocidade aparente de propagação das ondas ultrassónicas; (N) Absorção de água sob baixa pressão; (O) Lupa estereoscópica; (P) Microtomografia de raios-X; (Q) Microscópio eletrónico de varrimento; (-) indica que não foram ensaiadas provetes .

3.2. Fases de caracterização

3.2.1. Fase 1 – Caracterização dos substratos

Todos os substratos selecionados foram caracterizados com os seguintes ensaios/parâmetros de desempenho: massa volúmica, porosidade aberta, coeficiente de absorção de água por capilaridade, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e porosimetria por intrusão de mercúrio. Além dos ensaios listados (tabela 3.1) foi executada uma análise visual qualitativa da superfície dos substratos com a utilização de fotografias macroscópicas e lupa estereoscópica.

Os procedimentos de caracterização foram os mesmos utilizados na caracterização das argamassas e serão descritos nas seções seguintes.

3.2.2. Fase 2 - Caracterização da argamassa no estado fresco e da argamassa endurecida no molde normalizado

A produção da argamassa seguiu as orientações do fabricante utilizando-se 4,5 litros de água por saco de argamassa. A mistura mecânica foi efetuada com uma misturadora de bancada para a produção da argamassa industrializada. Logo após a conclusão da amassadura foram realizados os ensaios de consistência por espalhamento e massa volúmica com a argamassa ainda no estado fresco.

Para a produção dos provetes prismáticos, utilizaram-se moldes metálicos triplos, cujas características são definidas pela norma EN 1015-11 (CEN, 2019). A compactação foi realizada com um pilão manual em duas camadas (cerca de 10 pancadas por camada). Eliminou-se o excesso de argamassa da superfície com uma rasoira e iniciou-se o processo de cura. A figura 3.5 ilustra a preparação da argamassa no molde normalizado, (A) acabamento da superfície e (B) molde finalizado.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, foram moldados provetes circulares com o diâmetro de 100 mm e espessura 15 mm. Os provetes foram compactados com pilão manual em duas camadas (cerca de 10 pancadas por camada) (figura 3.6) e foram submetidos às mesmas condições de cura dos provetes prismáticos.

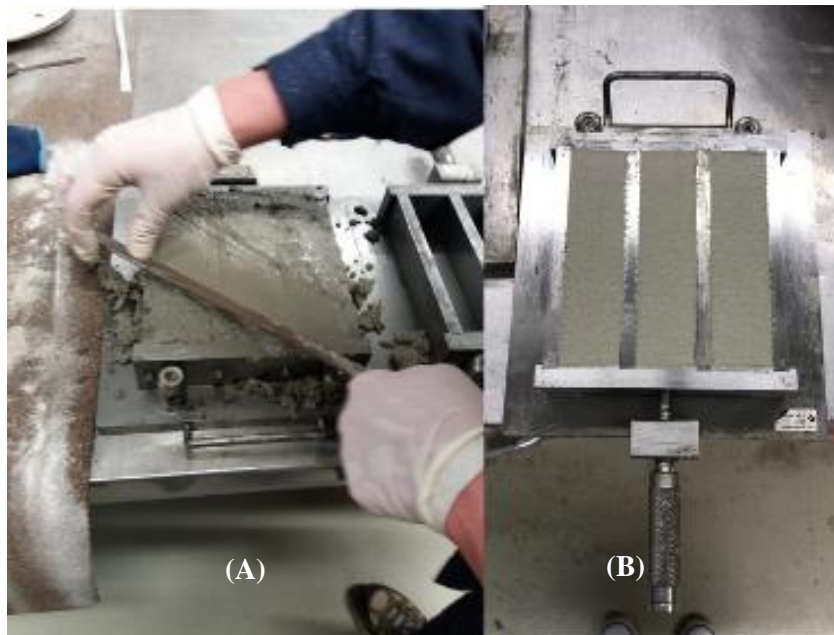


Figura 3.5 Preparação da argamassa (molde normalizado) - (A) Acabamento da superfície; (B) Molde finalizado



Figura 3.6 Provetes circulares - compactação manual

Logo após a moldagem dos provetes iniciou-se o processo de cura. A argamassa foi submetida a cura segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 2019), durante 28 dias:

- Primeiros 2 dias: temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, em saco de polietileno (no molde);
- 5 dias seguintes: temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, em saco de polietileno (desmoldado);
- 21 dias restantes: temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humidade relativa de $65\% \pm 5\%$ (sem o molde).

Finalizado o processo de cura e com o auxílio de uma serra circular, alguns dos provetes prismáticos foram cortados em fatias de 15 mm de espessura para a compatibilização geométrica e iniciou-se a caracterização por meio dos ensaios laboratoriais.

3.2.3. Fases 3, 4 e 5 - Caracterização da argamassa endurecida e destacada dos substratos

A produção da argamassa seguiu as orientações do fabricante utilizando-se 4,5 litros de água por saco de argamassa. A mistura foi efetuada com auxílio de um misturador elétrico (figura 3.7), até a pasta possuir um aspeto homogêneo, por 1 - 2 min (conforme indicação do fabricante), com a finalidade de simular uma situação mais próxima possível do real.



Figura 3.7 Preparação da argamassa

Para a aplicação da argamassa nos substratos, além do posicionamento da malha de fibra de vidro na interface, recorreu-se a moldes de madeira para garantir a uniformidade da espessura de 15 mm da argamassa aplicada. Após a amassadura, procedeu-se à aplicação da argamassa com o auxílio de uma colher de pedreiro. A figura 3.8 ilustra a aplicação da argamassa no substrato.



Figura 3.8 Aplicação da argamassa no substrato - (A) Aplicação da argamassa; (B) Acabamento da superfície; (C) Provete finalizado

Com a argamassa ainda no estado fresco, foram feitas marcações para garantir as dimensões dos provetes quando destacados (Figura 3.9), quadrados de 40 x 40 mm e círculos com 100 mm de diâmetro.



Figura 3.9 Provetes com as dimensões marcadas, quadrados (40 x 40 mm) e circulares (diâmetro de 10 cm)

Após a finalização da marcação dos provetes, estes tiveram a sua cura em local abrigado por 28 dias com a média de 17°C e 66% de humidade relativa. Terminado este período de cura inicial, os provetes foram separados em três conjuntos. O primeiro passou logo à fase de ensaios, o segundo foi submetido ao envelhecimento acelerado, adaptado da norma EN 1015-21 (CEN, 2002), que contempla duas séries de quatro ciclos que estão descritos abaixo. A adaptação (primeiro passo da segunda série de quatro ciclos) foi executada por questões técnicas.

1ª série – quatro ciclos

- $60 \pm 2^\circ\text{C}$ durante $8\text{h} \pm 15\text{ min}$;
- $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ humidade relativa durante $30 \pm 2\text{ min}$;
- $-15 \pm 1^\circ\text{C}$ durante $15 \pm 15\text{min}$;
- $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ humidade relativa durante $30 \pm 2\text{ min}$.

2ª série – quatro ciclos

- Os conjuntos foram humedecidos com 300 ml de água cada e ficaram condicionados em câmara climática à 95% de humidade relativa e $20 \pm 1^\circ\text{C}$ durante $8\text{ h} \pm 15\text{min}$.
- $20 \pm 2^\circ\text{C}$ / $65 \pm 5\%$ humidade relativa durante $30 \pm 2\text{min}$.
- $-15 \pm 1^\circ\text{C}$ durante $15\text{min} \pm 15\text{min}$.
- $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ humidade relativa durante $30 \pm 2\text{min}$.

O terceiro conjunto foi colocado no exterior até completar 300 dias. A figura 3.10 ilustra as condições de cura que os conjuntos de argamassa / substrato foram submetidos. Após os períodos de cura, procedeu-se ao destaque dos provetes dos substratos de forma manual e então, iniciou-se a caracterização através dos ensaios laboratoriais.



Figura 3.10 Condições de cura. (A) Local de armazenamento coberto, (B) Local de acondicionamento dos provetes no exterior. (C) Câmara para envelhecimento acelerado

3.2.4. Fase 6 - Análise dos dados obtidos

Para auxiliar a compreensão das diferenças entre a argamassa endurecida nos moldes normalizados e as argamassas endurecidas nos substratos e posteriormente destacadas, recorreu-se a análise de variância (ANOVA) com as seguintes premissas: independência das observações, normalidade dos dados, homoscedasticidade (homogeneidade das variâncias) das amostras e ausência de *outliers* (Bewick et al., 2004).

Todos os resultados apresentados foram tratados pelo método de Pierce (Ross, 2003). Os *outliers* identificados foram removidos e estão marcados em negrito nos anexos A, B e C.

Desse modo, foram estabelecidas as hipóteses H0 (Não existe diferença entre os resultados) e H1 (Os resultados são estatisticamente diferentes). Foi então realizado o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados e o teste de Levene para a homoscedasticidade das variâncias.

Como a homoscedasticidade dos dados não foi verificada, optou-se pela ANOVA com a correção de Welch (Mendes et al., 2010) e o *Post-Hoc* de Games-Howell (Hilton e Armstrong, 2006) para identificar a diferença entre os grupos.

Para os dados aos 28 dias cura, foi analisada a correlação entre os dados dos substratos e os dados obtidos das argamassas endurecidas e destacadas dos substratos por meio da matriz de correlação de Pierce.

Para a realização da ANOVA é desejável que para cada grupo tenha aproximadamente 20 observações (Hair, et al., 2009), no caso do teste de Kruskal-wallis, equivalente não paramétrico da ANOVA, é desejável o mínimo de 8 observações por grupo (Souza e Castro, 2012). Portanto, para os parâmetros de desempenho com mais de 20 observações, foi utilizada a ANOVA com o *Post-Hoc* de Games-Howell, para os parâmetros com mais de 8 observações e menos do que 20 foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis com o *Post-Hoc* de Dunn.

Em relação aos dados de caracterização dos substratos foi executada a matriz de correlação de Pierce para compreender a relação entre as propriedades dos substratos.

Para a realização da análise estatística, recorreu-se aos *softwares* Jamovi (Jamovi, 2021) e RealStatistics (Zaiontz, 2020).

3.2.5. Fase 7 - Algoritmos de aprendizagem de máquina

Nesta fase procura-se prever os valores das características do substrato (porosidade aberta, massa volúmica, coeficiente de absorção por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água) a partir das características da argamassa.

Foram utilizados algoritmos de aprendizagem de máquina (*machine learning*) para prever as características do substrato, em função das características da argamassa. Os algoritmos selecionados para o estudo são: *Random Forest* (RF), *Artificial Neural Network* (ANN) e *Support Vector Machine* (SVM). A escolha dos algoritmos deve-se ao fato de serem muito utilizados na área das argamassas, conforme já visto no capítulo 2. Além da utilização desses algoritmos foi realizada análise com o recurso estatístico de regressão linear para fins de comparação.

Para atingir o objetivo, o estudo está dividido em duas partes, algoritmos de classificação e de regressão. Na parte de classificação, busca-se prever qual o substrato em função das características da argamassa e na parte de regressão qual o valor das características específicas do substrato (massa volúmica, porosidade aberta, coeficiente de absorção de água e permeabilidade ao vapor de água) em função das características da argamassa.

Em relação as métricas de validação dos algoritmos, tem-se:

I. Para algoritmos no modo de classificação (Eq-3.1 a 3.3):

- AUC (Área sob a curva ROC) é a área sob a curva de operação do recetor, é a área sob a curva formada pelo gráfico entre a taxa de registos positivos, que são positivos (TP) e a taxa de falsos positivos (FP);
- CA (Acurácia) é a percentagem de amostras corretamente classificados, é a divisão de todos os registos classificados corretamente pelo total;
- F1 é a média harmónica entre precisão e sensibilidade:

$$F1 = \frac{2 * \text{Precisão} * \text{Sensibilidade}}{\text{Precisão} + \text{Sensibilidade}} \quad \text{Eq-3.1}$$

- Precisão é a proporção de verdadeiros positivos (TP) entre as instâncias classificadas como positivas (TP + FP):

$$\text{Precisão} = \frac{TP}{TP + FP} \quad \text{Eq-3.2}$$

- Sensibilidade é a proporção de verdadeiros positivos (TP) entre todas as instâncias positivas nos dados (TP + FN):

$$\text{Sensibilidade} = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{Eq-3.3}$$

Onde: verdadeiro positivo (TP) indica a quantidade de dados classificados como positivos de forma correta; verdadeiro negativo (TN) indica a quantidade de dados classificados como negativos corretamente; falso positivo (FP) é a quantidade de valores classificados como positivo de maneira incorreta e falso negativo (FN) é a quantidade de valores classificados como negativos incorretamente.

Para análise dos resultados, utiliza-se também a matriz de confusão (Heydarian et al., 2022), que fornece a proporção de instâncias entre a classe prevista e a real, cada linha da matriz representa a classificação correta e as colunas a classificação prevista. Tal matriz permite a visualização das classes que o algoritmo está classificando de forma errada (“se confundindo”). A tabela 3.2 exemplifica a matriz de confusão.

Tabela 3.2 Matriz de confusão

		Valor Real	
		Positivo	Negativo
Valor Previsto	Positivo	Verdadeiro Positivo	Falso Positivo
	Negativo	Falso Negativo	Verdadeiro Negativo

Fonte: Adaptado de Izbicki e Santos (2020)

II. Para algoritmos no modo de regressão:

- MAE (erro absoluto médio) representa a diferença entre os valores originais e previstos extraídos pela média da diferença absoluta sobre o conjunto de dados;
- MSE (erro quadrático médio) representa a diferença entre os valores originais e previstos extraídos pelo quadrado da diferença média sobre o conjunto de dados;
- RMSE (Raiz do erro quadrático médio) é a taxa de erro pela raiz quadrada de MSE;
- R2 (coeficiente de determinação) representa o coeficiente de quão bem os valores se ajustam em comparação com os valores originais. Os valores variam de 0 a 1. Quanto mais alto for o valor, melhor será o modelo.

As métricas podem ser expressas de acordo com as equações 3.4 a 3.7:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \tag{Eq-3.4}$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{Eq-3.5}$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{Eq-3.6}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - y^*)^2} \tag{Eq-3.7}$$

Onde:

Y é o valor predito

Y* é a média dos valores

Para o desenvolvimento do estudo, foi utilizado o *software* Orange (Demsar et al., 2013) e a base de dados foi obtida de forma experimental, durante o desenvolvimento da tese, de acordo com a metodologia apresentada neste capítulo.

A base de dados construída possui 410 amostras para cada parâmetro de desempenho (porosidade aberta, massa volúmica, coeficiente de absorção por capilaridade, resistência à compressão e índice de secagem) da argamassa aplicada aos substratos (tijolo furado, tijolo maciço, bloco de betão, bloco de betão leve, placa de betão e molde metálico).

A base de dados utilizadas está discriminada no anexo D. Todos os provetes foram ensaiados aos 28 dias de cura. Apesar da permeabilidade ao vapor de água da argamassa ser um parâmetro relevante, não foi possível obter a quantidade necessária de amostras para utilização dos algoritmos de aprendizagem de máquina. Como é possível observar na tabela 3.1 foram obtidos apenas 28 provetes de permeabilidade ao vapor de água. Esta quantidade é incompatível com o obtido nos demais parâmetros utilizados.

3.2.6. Campanhas experimentais preliminares

As campanhas preliminares foram executadas para afinar a metodologia, tendo como objetivo ajustar a forma de confeção dos provetes e o método de destacamento dos mesmos. Para isso, realizou-se uma campanha para verificar a influência da rede de fibra de vidro posicionada na interface argamassa / substrato e uma campanha de caracterização da argamassa aplicada no tijolo furado para avaliar a influência do substrato no comportamento face a água da argamassa.

3.2.6.1. Análise da influência da rede de fibra de vidro na interface

A campanha experimental preliminar levada a cabo teve como objetivo analisar a rede de fibra de vidro posicionada na interface argamassa/substrato iria influenciar as características da argamassa (Travincas et al. 2022). A rede tem como objetivo auxiliar no destaque da argamassa.

A rede desta campanha foi a mesma utilizada no desenvolvimento da tese e possui as seguintes características: abertura de malha de 5 x 5 mm e massa específica de 158 g/m².

Para esta campanha, foram moldados conjuntos idênticos de argamassa/substrato em que metade dos conjuntos produzidos a rede de fibra de vidro foi posicionada na interface argamassa/substrato e na outra metade não se colocou qualquer tipo de rede.

A metodologia de aplicação da argamassa e execução dos ensaios foi a mesma já descrita anteriormente com a diferença do humedecimento prévio do substrato, que para o caso das campanhas realizadas no âmbito da tese é dispensado pelo fabricante da argamassa utilizada.

Após a execução dos ensaios, foi realizado o teste de hipótese (teste-*t*), onde a hipótese H₀ é que não existe diferença entre as médias e a hipótese H₁ é que as médias são estatisticamente diferentes. Para isso, o limite do valor-*p* considerado foi de 0,05, onde valores acima não se rejeita a hipótese H₀.

3.2.6.2. Influência do substrato em tijolo cerâmico na resistência à água das argamassas aplicadas

Neste trabalho (Travincas et al., 2020) comparou-se a argamassa de cimento tradicional com o traço de 1:4 em volume, com o razão água/cimento de 1, moldada em moldes metálicos, com a mesma argamassa aplicada, no substrato de tijolo furado, e posteriormente destacada.

A metodologia utilizada é a mesma utilizada na tese, mas no caso da tese é analisada uma argamassa industrializada. Por ser uma argamassa tradicional, os substratos foram previamente humedecidos. Os ensaios realizados foram: porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e índice de secagem.

3.3. Procedimentos de ensaio

3.3.1. Consistência por espalhamento da argamassa no estado fresco

A consistência por espalhamento quantifica a fluidez da argamassa fresca. Com este ensaio avalia-se a trabalhabilidade da argamassa.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 1015-3 (CEN, 1999). Para isso, colocou-se a argamassa num molde troncocónico sobre uma mesa de espalhamento, em duas camadas compactadas com um pilão manual (cerca de 10 pancadas por camada). Com o molde totalmente preenchido e após eliminar o excesso (incluindo a limpeza do disco), retira-se o molde e roda-se a manivela da mesa por 15 vezes com frequência constante. A figura 3.11 ilustra o ensaio. Por fim, mede-se o diâmetro da argamassa em duas direções perpendiculares com o auxílio de um paquímetro digital.



Figura 3.11 Ensaio de consistência por espalhamento

3.3.2. Massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco

A massa volúmica da argamassa fresca é determinada pelo quociente entre sua massa e o volume que ocupa. A realização deste ensaio foi baseada nas instruções da norma EN 1015-6 (CEN, 1998), e consiste em encher um recipiente de volume e massa conhecidos até a metade de seu volume. Em seguida, compacta-se esta camada com 10 pancadas, procede-se ao preenchimento do restante do volume e repete-se o processo de compactação. Alisa-se a superfície com a utilização de uma rasoira, limpa-se os resíduos e procede-se a pesagem. São realizadas três pesagens e o resultado é a média das pesagens, (que não devem ter um desvio superior a 10% em relação à média) a dividir pelo volume do recipiente.

3.3.3. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

A massa volúmica aparente é definida como a massa por unidade de volume, NP EN 1936 (IPQ, 2008). A porosidade aberta é o quociente entre o volume dos poros e o volume aparente.

Para a realização do ensaio os provetes foram secos em estufa à temperatura de 60°C, até obtenção de massa constante e pesados (M_s). Depois foram imersos em água até à saturação, por 48 horas, e pesados em imersão (M_h) (pesagem hidrostática), de seguida foram retirados da água, e, após remoção do excesso, foram novamente pesados para se obter a massa saturada (M_{sat}).

Calculou-se então a massa volúmica aparente por meio da expressão Eq-3.8:

$$MV = \frac{M_s}{M_{sat} - M_h} \cdot \rho_{rh} \quad (\text{Eq-3.8})$$

A porosidade aberta foi calculada por meio da expressão Eq-3.9:

$$P_{ab} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_h} \quad (\text{Eq-3.9})$$

Onde:

MV é a massa volúmica aparente em kg/m³;

Ms é a massa do provete seco, em g;

Mh é a massa do provete imerso em água, em g;

Msat é a massa do provete saturado, em g;

prh é a massa volúmica da água à temperatura ambiente, em kg/m³;

Pab é a porosidade aberta em %.

3.3.4. Coeficiente de absorção de água por capilaridade

O coeficiente de absorção de água por capilaridade (A_w) mede a capacidade que o material possui de absorver água por ação de forças de sucção capilares. O coeficiente de absorção por

capilaridade foi determinado de acordo com a norma ISO 15148 (ISO, 2002), com as devidas adaptações em relação as dimensões dos provetes.

Os provetes foram impermeabilizados, com filme plástico, nas suas faces laterais para garantir um fluxo unidirecional. Todas as amostras foram colocadas numa tina com tampa (para evitar a evaporação da água) com uma lâmina de água com altura de 5 a 7 mm aproximadamente, sendo o nível conferido periodicamente. No caso dos substratos, as amostras não foram impermeabilizadas lateralmente devido a irregularidade da forma. A figura 3.12 ilustra o ensaio realizado.

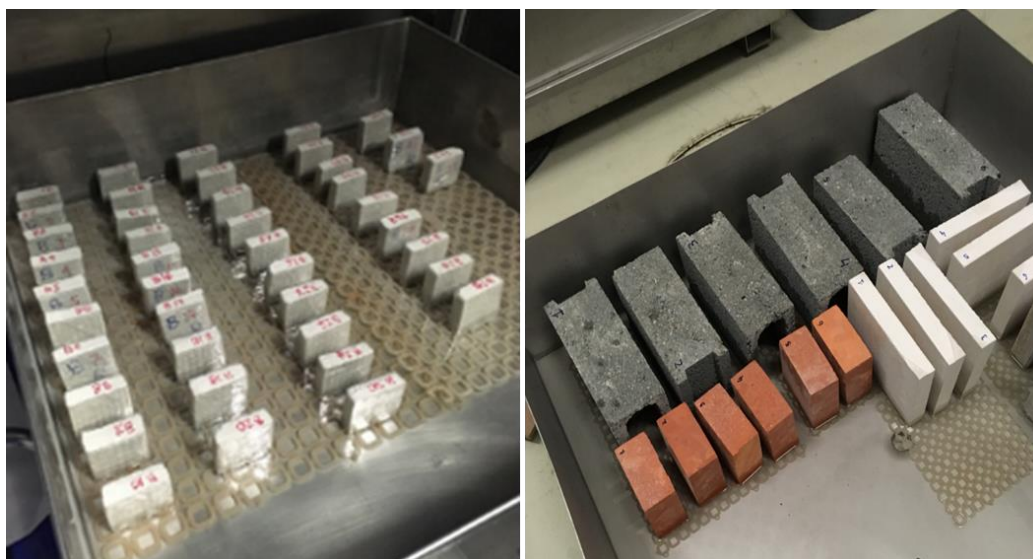


Figura 3.12 Ensaio de absorção de água por capilaridade (esq. - argamassa; dir. - substratos)

As amostras foram retiradas da água, pesadas e recolocadas após 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 1 hora, 1 hora e 30 min, 2 horas, 4 horas, 8 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas do início do ensaio.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade representa a velocidade de absorção de água do material. Por meio da expressão Eq-3.10 determina-se a quantidade de água absorvida.

$$\Delta m_t = \frac{(m_t - m_i)}{A} \quad (\text{Eq-3.10})$$

Onde:

m_i é a massa inicial em kg;

m_t é a massa no instante t , em kg;

A é a área da amostra em contato com a água, em m^2 .

Seguidamente, traça-se o gráfico da variação de massa por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo. Segundo a norma indicada (ISO, 15148), se o gráfico for do tipo “A”, o cálculo do coeficiente de absorção por capilaridade é feito por meio da seguinte expressão Eq-3.11:

$$A_w = \frac{\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}} \quad (\text{Eq-3.11})$$

Onde:

A_w é o coeficiente de absorção por capilaridade em $kg/m^2 \cdot s^{0,5}$;

$\Delta m'_{tf}$ é a variação de massa, por área, no final da reta, em kg;

$\Delta m'_0$ é a variação de massa, por área, no início d reta, em kg;

t_f é o tempo decorrido entre o início e o final da reta, em segundos.

Caso seja o gráfico do tipo “B”, o coeficiente de absorção por capilaridade deve ser calculado segundo a expressão Eq-3.12:

$$A_w = \frac{\Delta m_{tf}}{\sqrt{86400}} \quad (\text{Eq-3.12})$$

Onde:

A_w é o coeficiente de absorção por capilaridade em $kg/m^2 \cdot s^{0,5}$;

Δm_{tf} é a variação de massa, por área, após 24 horas, em kg.

3.3.5. Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água de um material homogêneo pode ser definida como sendo a quantidade de vapor de água que o atravessa, por unidade de tempo e espessura, quando este material está submetido a diferentes pressões de vapor entre as suas faces.

A determinação da permeabilidade ao vapor de água baseou-se nos procedimentos das normas NP EN 1015-19 (IPQ, 2008a) e ISO 12572 (ISO, 2016). Provetes com aproximadamente 10 cm de diâmetro e 1,5 cm de espessura, foram colocados sobre tina de vidro com água (método da tina húmida), de forma que exista uma lâmina de ar de aproximadamente 15 mm entre a água e o provete. Posteriormente, os bordos da amostra e da tina são devidamente impermeabilizados com tinta impermeabilizante, fita e parafina, para que a difusão de vapor seja unidirecional e exclusivamente através do provete. A figura 3.13 ilustra a preparação das amostras para o ensaio.

O conjunto foi colocado numa camara climática de temperatura e humidade constantes (23 ± 2 °C e humidade relativa de $50 \pm 5\%$). Foi feita uma pesagem inicial e periódica até se obter uma variação de massa por unidade de tempo constante (corrente estacionária de difusão).



Figura 3.13 Ensaio de permeabilidade ao vapor de água

A partir dos registos das pesagens, efetua-se a representação gráfica da variação do peso em função do tempo. Quando a transmissão de vapor se revela constante, determina-se a inclinação da reta que une os pontos em que se verificou esta circunstância e que é igual ao fluxo de difusão de vapor de água e é dado pela Eq-3.13:

$$G = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{Eq-3.13})$$

Onde:

G é o fluxo de difusão de vapor de água, em kg/s;

$m_2 - m_1$ é a variação da massa depois de estabelecida a corrente estacionária de difusão, em kg;

$t_2 - t_1$ é o intervalo de tempo correspondente à variação de massa, em s.

A partir deste valor podemos obter a densidade de fluxo de difusão de vapor por meio da expressão Eq-3.14:

$$g = \frac{G}{A} \quad (\text{Eq-3.14})$$

Onde:

g é a densidade de fluxo de difusão de vapor, em kg/s.m²;

G é o fluxo de difusão de vapor de água, em kg/s;

A é a área de exposição do provete, em m².

A permeância ao vapor de água (W), corresponde à densidade de fluxo de vapor que atravessa a argamassa e dada pela equação Eq-3.15 e 3.16:

$$W = \frac{g}{\Delta_{pv}} \quad (\text{Eq-3.15})$$

Em que,

$$\Delta_{pv} = p_{\text{sat}} \cdot \frac{\phi_1 - \phi_2}{100} \quad (\text{Eq-3.16})$$

Sendo:

p_{sat} é a pressão de saturação à temperatura de ensaio (23°C), em Pa;

$\phi_1 - \phi_2$ é a diferença entre as humidades relativas no interior e no exterior da tina do ensaio, em %.

A permeabilidade ao vapor de água é dada pela expressão Eq-3.17:

$$\delta = W.d \quad (\text{Eq-3.17})$$

Onde:

δ é a permeabilidade ao vapor de água, em kg/(m.s.Pa);

W é a permeância ao vapor de água, em kg/m².s.Pa;

d é a espessura dos provetes, em m.

Foi então determinado o valor relativo ao fator de resistência à difusão do vapor de água, μ , que indica o número de vezes que a resistência à difusão de um provete de argamassa é maior do que a de uma camada de ar em repouso, de espessura e condições ambientais iguais. O μ é dado pela expressão Eq-3.18:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (\text{Eq-3.18})$$

Onde:

δ_a é o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar, em kg/(m.s.Pa), com valor de $1,95 \times 10^{-10}$ kg/(m.s.Pa);

δ é a permeabilidade ao vapor de água, em kg/(m.s.Pa).

3.3.6. Índice de secagem

O ensaio para determinação do índice de secagem tem como objetivo analisar a capacidade de secagem das argamassas. O ensaio foi executado de acordo com as recomendações da norma EN 16322 (CEN, 2013) e da recomendação N° II.5 da RILEM:1980. Após saturação dos provetes, as suas faces foram impermeabilizadas, com filme plástico, com exceção da face superior e acondicionados numa câmara climática à 23 ± 2 °C e humidade relativa de 50 ± 5 % (figura 3.14).



Figura 3.14 Ensaio de índice de secagem

Para a execução do ensaio, pesaram-se os provetes de 10 em 10 minutos na primeira hora e de hora em hora até completar 8 horas. Após essa pesagem os provetes foram pesados de 24 em 24 horas até que a diferença de massa entre duas pesagens consecutivas fosse inferior a 0,1%.

Atingida a estabilização, foi determinado o índice de secagem de acordo com as seguintes expressões Eq-3.19 e 3.20:

$$W_i = \frac{(m_i - m_0)}{m_0} \quad (\text{Eq-3.19})$$

Onde:

W_i é o teor de humidade no instante i , em %;

m_i é a massa do provete no instante i , em gramas;

m_0 é a massa do provete seco, em gramas.

$$I_s = \sum_{i=1}^n \left[(t_i - t_{i-1}) \frac{W_{i-1} + W_i}{W_{\text{máx}} t_f} \right] \quad (\text{Eq-3.20})$$

Em que:

I_s é o índice de secagem;

t_i é o tempo de ensaio i , em horas;

W_i é o teor de humidade no instante i , em %;

t_f é o tempo final do ensaio, em horas.

3.3.7. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico, no caso das argamassas, corresponde à capacidade de deformação sob a ação de tensões associadas a cargas e variações higrotérmicas.

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi utilizada a norma NP EN 14146 (IPQ, 2006), referente a pedra natural, e foram utilizados os provetes prismáticos.

A frequência de ressonância fundamental foi determinada por meio de um sistema de aquisição multi-analisador PulseTM, modelo 3560-C, da marca "Bruel & Kjaer". Foi utilizado um martelo de impacto modelo 8206 e um acelerómetro modelo 8339, ambos da marca "Bruel & Kjaer", apresentados na Figura 3.15. Após registo da frequência de ressonância fundamental longitudinal, F_L , em Hz, determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, Ed_L , em MPa, por meio da equação Eq-3.14.

$$Ed_L = 4 \cdot 10^{-6} \cdot l^2 \cdot F_L^2 \cdot \rho \cdot T \quad (\text{Eq-3.21})$$

Onde,

l é o comprimento do provete;

ρ é a massa volúmica em g/mm^3 ;

T é o fator de correção associado ao raio de giração da secção e ao coeficiente de Poisson.

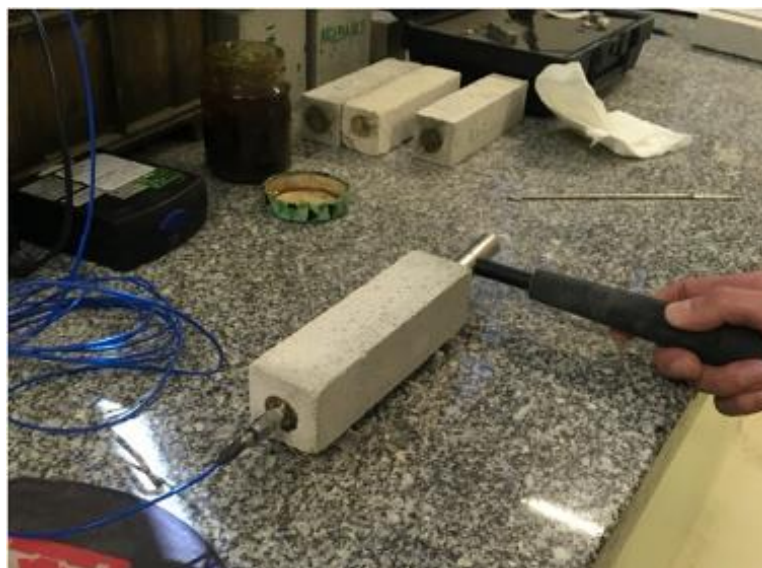


Figura 3.15 Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

3.3.8. Resistência à tração por flexão e à compressão

As resistências mecânicas da argamassa traduzem a capacidade do material de resistir às tensões introduzidas. Quanto mais elevada for a relação entre as resistências (à tração e à compressão) mais dúctil será a argamassa e então maior será a resistência às tensões.

As resistências mecânicas foram determinadas de acordo com a EN 1015-11 (CEN, 2019). No ensaio de resistência à flexão, cada provete é colocado com uma das faces de moldagem sobre apoios, aplica-se uma carga sem choque a uma velocidade de 50 N/s com o intuito de a rotura ocorrer num intervalo de tempo entre 30 e 90 segundos. A força de rotura de flexão corresponde à máxima força aplicada pela máquina que conduz à rotura do provete, Eq-3.22.

$$R_t = 1,5 \frac{F_f \cdot L}{b^3} \quad (\text{Eq-3.22})$$

Em que,

R_t é a resistência a tração por flexão, em MPa;

F_f é a carga de rotura à tração por flexão, em N;

L é a distância entre os apoios inferiores, em mm;

b é a largura da base do provete, em mm.

Para o ensaio de resistência à compressão utiliza-se uma das metades dos prismas resultantes do ensaio à flexão. Estas metades são colocadas de forma que o carregamento seja aplicado nas faces que estiveram em contacto com o molde metálico e em seguida aplica-se uma carga sem choque a uma velocidade de 100 N/s para que a rotura ocorra entre os 30 e 90 segundos, obtendo-se então a força de compressão correspondente à rotura. A resistência à compressão é obtida pela Eq-3.23. No caso da tese o mesmo procedimento foi utilizado para os provetes compatibilizados. A figura 3.16 ilustra os ensaios realizados.

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad (\text{Eq-3.23})$$

Em que:

R_c é a resistência à compressão, em MPa;

F_c é a carga de rotura à compressão, em N;

S é a área de aplicação da carga, em mm².



Figura 3.16 Ensaio de resistência a tração por flexão (esq.) e à compressão (dir.)

3.3.9. Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosimetria por intrusão de mercúrio é um ensaio que permite quantificar o percentual e a distribuição de tamanhos de poros existentes numa dada amostra sólida. Os ensaios foram executados conforme a norma ISO 15901-1 (ISO, 2005). Utilizou-se o porosímetro de mercúrio da marca Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, com capacidade para atingir 60000 psi. A figura 3.17 ilustra o equipamento utilizado no ensaio.

Neste ensaio, foram utilizados fragmentos das argamassas e dos substratos, e todos foram previamente submetidos à secagem até a obtenção de massa constante. Esses fragmentos foram rachados e não serrados, a partir do interior das amostras (evitando as bordas), para serem o mais representativos possível.



Figura 3.17 Ensaio de porosimetria

O *software* do equipamento utilizado permitiu determinar o volume total de poros, VP, em cm^3/g , e o diâmetro médio dos poros, dP, em nm. Foi também possível obter as curvas de intrusão diferencial (ml/g) em função do diâmetro dos poros (nm), para cada amostra.

3.3.10. Resistência adesiva

A resistência adesiva é determinada pela aplicação de uma tensão de tração perpendicular à superfície com a intenção de destacar o revestimento. O ensaio foi realizado de acordo com a Norma EN 1015-12 (CEN, 2016), a figura 3.18 ilustra a execução do ensaio. A resistência adesiva é calculada segundo a equação Eq-3.24.

$$R_u = \frac{F_u}{A} \quad (\text{Eq-3.24})$$

Onde:

R_u é a resistência adesiva, em MPa;

F_u é a carga de rotura à tração, em N;

A é a área de aplicação da carga em mm².



Figura 3.18 Ensaio de resistência adesiva

3.3.11. Velocidade aparente de propagação das ondas ultrassônicas (PUNDIT)

Para determinar o módulo de elasticidade dinâmico da argamassa aplicada nos substratos utilizou-se o ensaio de ultrassom, EN 12504-4 (CEN, 2004).

O equipamento utilizado foi do tipo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*). São emitidas vibrações acústicas que, ao atravessarem o material sofrem alterações na velocidade de propagação das ondas, permitindo assim determinar o módulo de elasticidade dinâmico do material, que é calculado segundo a equação Eq-3.25:

$$E_d = \rho \cdot v^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (\text{Eq-3.25})$$

Onde:

E_d é o módulo de elasticidade dinâmico em MPa;

ρ é a massa volúmica do material em kg/m³;

v é a velocidade de propagação da onda em km/s;

ν é o coeficiente de Poisson.

Para a execução do ensaio os pontos de leitura são marcados a superfície do provete. Foram marcados 9 pontos alinhados em duas linhas, com a distância de 2 cm entre eles. Seguidamente são posicionados os transdutores, método indireto, e realiza-se a leitura do tempo de propagação da onda no equipamento. Como o objetivo da tese é a comparação dos resultados da argamassa endurecida em moldes laboratoriais e a argamassa endurecida em diversos substratos, utilizou-se o mesmo equipamento e procedimento para todos os casos de estudo.

A leitura ocorreu com um dos transdutores fixos no primeiro ponto e o segundo transdutor percorrendo os demais pontos marcados. A figura 3.19 ilustra o ensaio executado.

O módulo de elasticidade considerado no desenvolvimento da tese será o obtido por este método, pois o mesmo é aplicável aos provetes de argamassa endurecida nos moldes e aos provetes de argamassa endurecida nos substratos, tornando possível a comparação dos resultados.

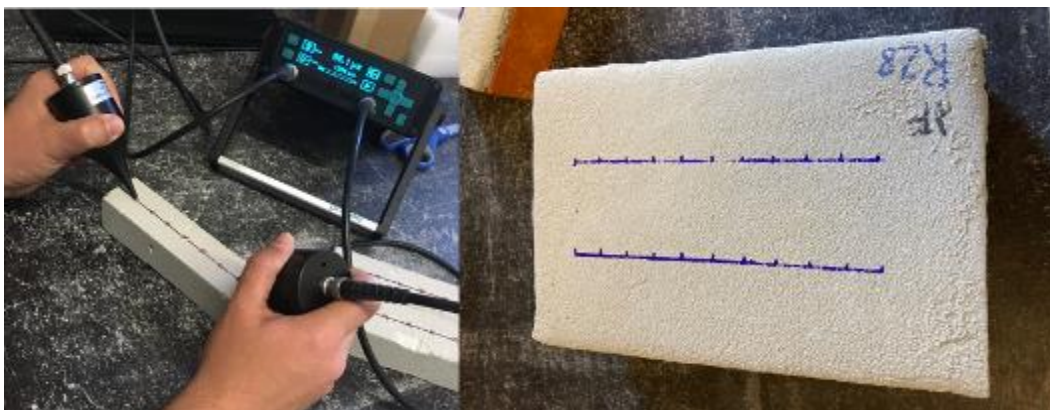


Figura 3.19 Ensaio de ultrassom, (esq.) execução do ensaio no provete prismático; (dir.) conjunto argamassa/substrato com os pontos de leitura marcados

3.3.12. Absorção de água sob baixa pressão (Tubos de *Karsten*)

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão (Tubos de *Karsten*) consiste na quantificação da quantidade de água absorvida por uma superfície após um período de tempo definido. O ensaio foi realizado com base na ficha de ensaio FE Pa 39 do LNEC (2002).

Para a execução do ensaio foram utilizados tubos de *Karsten*, que foram fixos ao provete com o auxílio de mástique. Após a secagem da mástique, os tubos foram cheios com água até ao seu nível máximo. Foram realizadas leituras do abaixamento do nível da altura da água nos tubos, após 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 60 minutos, com reposição de água nos tubos, sempre que necessário. A figura 3.20, ilustra o ensaio.

Finalizado o ensaio traçam-se os gráficos resultantes das leituras efetuadas, com o volume de água absorvido, em cm³, em função do tempo decorrido em minutos. Determina-se também o coeficiente de absorção de água (PROCEQ, 2001 apud Flores-Colen, 2009), por meio da expressão Eq-3.26.

$$C_{ab} = \frac{m_{ab} \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{t}} \quad (\text{Eq-3.26})$$

Onde:

C_{ab} é o coeficiente absorção de água;

M_{ab} é a massa de água absorvida em g;

d é o diâmetro médio da abertura inferior do tubo;

t é o intervalo de tempo medido em minutos.

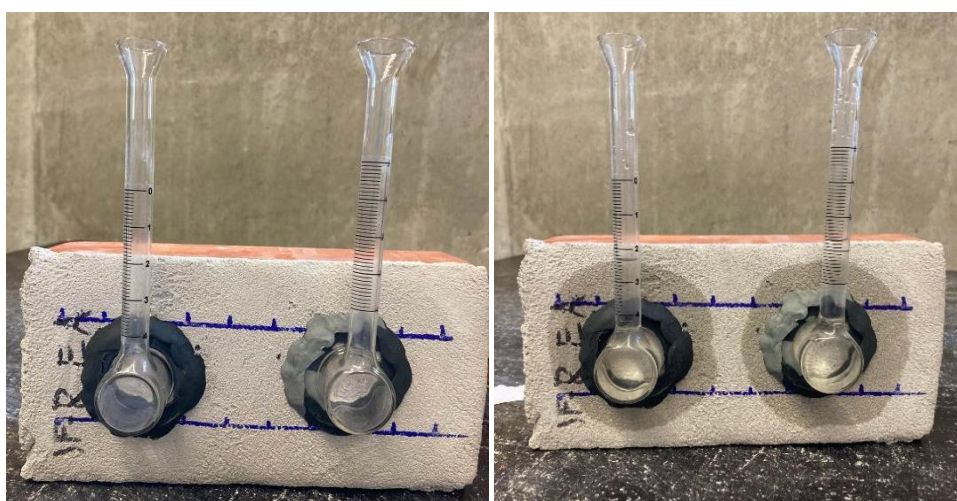


Figura 3.20 Ensaio de permeabilidade à água sob pressão (esq: início do ensaio; dir: ensaio em execução)

3.3.13. Microtomografia de raios-X (μ CT)

A metodologia utilizada para a μ CT percorreu as seguintes etapas: (1) seleção e preparação (corte) das amostras; (2) aquisição de radiografias; (3) processamento dos dados; e (4) interpretação dos resultados. A aquisição foi feita com o scanner SkyScan 1172 (Figura 3.21), existente no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do IST (LAIST), que dispõe de uma câmara digital com 1.3 Mpixel.

Utilizou-se a voltagem de 100 kV e intensidade de corrente de 100 μ A. Dadas as dimensões dos provetes, a melhor resolução das imagens foi de 9.41 μ m (pixel). O uso de maiores resoluções implicaria a redução do tamanho do provete, diminuindo assim a sua representatividade. Nas condições operatórias foi usado um filtro de Al para garantir mais contraste nas imagens.

O processamento dos dados foi efetuado com software fornecido com o equipamento. A primeira operação a efetuar foi a reconstrução das imagens (NRecon®), que consiste na transformação das radiografias em secções do objeto. Essas secções podem ser visualizadas em conjunto através de programa dedicado (CTVox®). Foram utilizadas amostras da argamassa endurecida no molde e do conjunto argamassa/substrato aos 28 dias de cura.



Figura 3.21 Ensaio de microtomografia de raios-X

Uma dificuldade encontrada no estudo das argamassas aplicadas foi obter amostras de todo o conjunto argamassa/substrato para analisar a interface dos materiais. A figura 3.22 ilustra as amostras utilizadas.

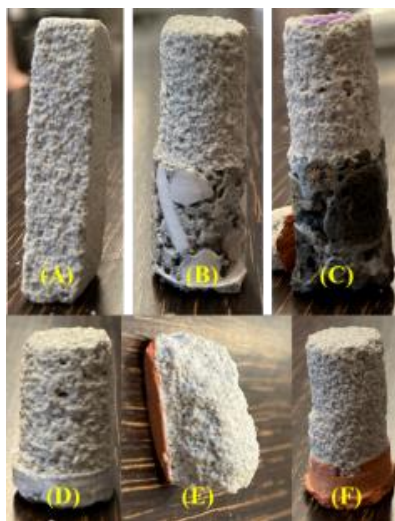


Figura 3.22 Amostras utilizadas no ensaio. (A) Argamassa endurecida no molde; (B) Argamassa/Bloco de betão; (C) Argamassa/Bloco de betão leve; (D) Argamassa/Placa de betão; (E) Argamassa/tijolo maciço; (F) Argamassa/Tijolo furado (diâmetro equivalente: 8-9 mm)

3.3.14. Microscópio eletrônico de varrimento

A microscopia eletrônica de varrimento foi realizada usando um microscópio eletrônico de varrimento de mesa Phenom Pro (Figura 3.23). As amostras dos conjuntos argamassa/substrato são montadas no porta-amostra próprio e fotografadas, sem revestimento, em modo de baixo vácuo usando uma tensão de aceleração de 15 kV e uma distância de trabalho de 2,5 mm.

As amostras analisadas (argamassa endurecida no molde normalizado e o conjunto substrato/argamassa) foram retiradas de pequenos fragmentos cuidadosamente extraídos dos corpos de prova aos 28 dias de cura.



Figura 3.23 Microscópio eletrônico de varrimento de mesa Phenom Pro

3.4. Síntese do capítulo

No presente capítulo foi sintetizada a metodologia e os procedimentos de ensaio das campanhas experimentais realizadas no âmbito desta tese no sentido de caracterizar a argamassa e os substratos em estudo.

Foram indicadas as fases de caracterização, descreveu-se toda a informação relativa à preparação de provetes, procedimentos de ensaio utilizados e a forma de análise dos dados obtidos.

Foram realizados 17 ensaios diferentes e ensaiados um total de 2054 provetes. Ressalta-se o elevado número de provetes ensaiados para a construção da base de dados a ser utilizada nos algoritmos de aprendizagem de máquina.

Os substratos foram caracterizados com os ensaios de massa volúmica; porosidade aberta; coeficiente absorção de água por capilaridade; e permeabilidade ao vapor de água.

As argamassas foram caracterizadas em relação à consistência por espalhamento; massa volúmica aparente - estado fresco; módulo de elasticidade dinâmico; coeficiente de absorção por capilaridade; índice de secagem; porosidade aberta; massa volúmica; permeabilidade ao vapor de água; porosimetria por intrusão de mercúrio; resistência à compressão; resistência à tração por flexão; resistência adesiva; velocidade aparente de propagação das ondas ultrassônicas; absorção de água sob baixa pressão; lupa estereoscópica; microtomografia de raios-X; microscópio eletrônico de varrimento.

As argamassas foram caracterizadas no estado endurecido aos 28 dias de cura (argamassa endurecida no molde normalizado e aplicada e destacada dos substratos); aos 28 dias de cura seguidos de envelhecimento acelerado (argamassa endurecida e destacada dos substratos); e aos 28 dias de cura seguidos de 300 dias de cura no exterior (argamassa endurecida e destacada dos substratos).

Para uma melhor comparação entre a argamassa endurecida no molde prismático metálico e a argamassa endurecida nos substratos foi realizada uma compatibilização geométrica dos provetes para que ambos ficassem com $40 \times 40 \times 15 \text{ mm}^3$. A análise estatística dos dados foi realizada por meio da ANOVA e matriz de correlação.

Os algoritmos de aprendizagem de máquina utilizados foram o *Support Vector Machine*, *Random Forest* e *Artificial Neural Network* no modo classificação e regressão. Foram utilizados 3 algoritmos diferentes para avaliar o desempenho dos mesmos nas diferentes análises propostas, e a com a técnica de regressão linear.

No capítulo seguinte é efetuada a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios descritos.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Campanhas experimentais preliminares

4.2 Caracterização dos substratos

4.3 Caracterização das argamassas

4.4 Síntese do capítulo

4. Apresentação dos resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados da campanha experimental realizada. Importa ressaltar que a produção dos provetes e a execução dos ensaios ocorreram em fases distintas, devido ao seu elevado número.

São apresentados os resultados referentes aos valores médios, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). Os resultados individuais estão inseridos nos anexos A, B e C. A análise e discussão dos resultados são apresentadas no capítulo 5.

A simbologia utilizada a partir desde capítulo é a seguinte:

- **Substratos:** **PB:** Placa de betão; **BB:** Bloco de betão; **BBL:** Bloco de betão leve; **TM:** Tijolo maciço; **TF:** Tijolo furado.
- **Argamassa endurecida nos moldes normalizados:** **MP:** argamassa moldada no molde prismático 16 x 4 x 4 cm³; **MC:** argamassa moldada no molde prismático com dimensões compatibilizadas 1,5 x 4 x 4 cm³.
- **Argamassa endurecida e destacadas dos substratos (aos 28 dias de cura):** **APB:** argamassa aplicada na placa de betão; **ABB:** argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL:** argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF:** argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM:** argamassa aplicada no tijolo maciço.
- **Argamassa endurecida e destacadas dos substratos (após envelhecimento acelerado):** **APB EA:** argamassa aplicada na placa de betão; **ABB EA:** argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL EA:** argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF EA:** argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM EA:** argamassa aplicada no tijolo maciço.
- **Argamassa endurecida e destacadas dos substratos (após 300 dias de cura no exterior):** **APB CE:** argamassa aplicada na placa de betão; **ABB CE:** argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL CE:** argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF CE:** argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM CE:** argamassa aplicada no tijolo maciço.

4.1. Campanhas experimentais preliminares

4.1.1. Análise da influência da rede de fibra de vidro na interface

Foi desenvolvida uma campanha experimental preliminar que teve como objetivo analisar se a colocação de rede de fibra de vidro na interface argamassa/substrato, para facilitar o destacamento da argamassa após endurecimento, iria influenciar os resultados obtidos.

Os resultados desta campanha estão apresentados com detalhe em Travincas et al. (2022). As tabelas (4.1, 4.2 e 4.3) apresentam, de forma resumida, os resultados relacionados com a argamassa de cimento.

Tabela 4.1 Argamassa de cimento aplicada em tijolo furado

Ensaio	Uso da rede	Média	CV	Valor- <i>p</i> (T<=t) Bi-caudal
Massa volúmica aparente (kg/m ³)	Com rede	1950,53	0,50%	0,483
	Sem rede	1944,2	0,60%	
Porosidade aberta (%)	Com rede	16,07	3,10%	0,099
	Sem rede	16,9	0,00%	
Coeficiente de absorção de água (kg/(m ² .s ^{0.5}))	Com rede	0,243	14,10%	0,062
	Sem rede	0,32	2,40%	
Índice de secagem	Com rede	0,187	0,80%	0,419
	Sem rede	0,17	19,70%	
Resistência à compressão (MPa)	Com rede	21,37	4,90%	0,393
	Sem rede	23,61	14,50%	

Tabela 4.2 Argamassa de cimento aplicada em placa de betão

Ensaio	Uso da rede	Média	CV	Valor- <i>p</i> (T<=t) Bi-caudal
Massa volúmica aparente (kg/m ³)	Com rede	1857,3	0,40%	0,299
	Sem rede	1844,47	0,90%	
Porosidade aberta (%)	Com rede	19,07	1,20%	0,102
	Sem rede	19,53	1,60%	
Coeficiente de absorção de água (kg/(m ² .s ^{0.5}))	Com rede	0,22	14,40%	0,105
	Sem rede	0,27	3,40%	
Índice de secagem	Com rede	0,121	9,30%	0,103
	Sem rede	0,09	22,40%	

Permeabilidade ao vapor de água (kg/(m.s.Pa))	Com rede	1,32 x 10 ⁻¹¹	6,40%	0,351
	Sem rede	1,42 x 10 ⁻¹¹	1,90%	
Resistência à compressão (MPa)	Com rede	13,47	23,10%	0,397
	Sem rede	11,51	13,10%	

Tabela 4.3 Argamassa de cimento aplicada em bloco de betão leve

Ensaio	Uso da rede	Média	CV	Valor- <i>p</i> (T<=t) Bi-caudal
Massa volúmica aparente (kg/m ³)	Com rede	1882,47	0,50%	0,814
	Sem rede	1885,05	1,00%	
Porosidade aberta (%)	Com rede	20,12	1,20%	0,685
	Sem rede	19,98	3,10%	
Coeficiente de absorção de água (kg/(m ² .s ^{0.5}))	Com rede	0,28	3,20%	0,911
	Sem rede	0,28	11,20%	
Índice de secagem	Com rede	0,103	31,20%	0,236
	Sem rede	0,13	13,20%	
Resistência à compressão (MPa)	Com rede	12,19	14,20%	0,593
	Sem rede	12,64	6,40%	

Pode-se perceber que o valor-*p* obtido em todos os casos não rejeita a hipótese H₀ ($p > 0,05$). O que significa que os resultados obtidos com e sem rede não apresentam diferença estatisticamente significativa. Portanto, pode-se considerar que a rede não influencia os resultados obtidos e por isso, procedeu-se à utilização da rede posicionada na interface argamassa/substrato em todas campanhas realizadas posteriormente, com exceção dos ensaios que não necessitavam que a argamassa fosse destacada (ultrassom, absorção de água sob baixa pressão, resistência adesiva, microtomografia de raios-X, lupa estereoscópica, microscópio eletrónico de varrimento).

4.1.2. Influência do substrato na argamassa aplicada

Os resultados desta campanha preliminar (tabela 4.4) foram publicados em Travincas et al. (2020). Como conclusão desta campanha experimental, foi possível observar que a argamassa destacada do substrato apresenta características ligeiramente diferentes das argamassas

endurecidas nos moldes. Tal fato indica que o substrato onde a argamassa é aplicada influencia as propriedades das argamassas relacionadas com a resistência à água.

Tabela 4.4 Resumo dos resultados da campanha preliminar

Ensaio	Argamassa endurecida e destacada do substrato de tijolo cerâmico furado	Argamassa endurecida no molde normalizado
Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/(m ² .s ^{0,5}))	0,320	0,340
Taxa de secagem fase 1 (kg/(m ² .h))	0,260	0,290
Taxa de secagem fase 2 (kg/(m ² .h ^{1/2}))	1,070	1,260
Porosidade aberta (%)	16,90	20,70
Massa volúmica aparente (kg/m ³)	1944	1870
Permeabilidade ao vapor de água (kg/(m.s.Pa))	1,08 x 10 ⁻¹¹	1,29 x 10 ⁻¹¹

É possível perceber, pela tabela 4.4, que a aplicação da argamassa sobre o tijolo fez com que a mesma ficasse mais compacta, com menor porosidade aberta (cerca de 18%), menor absorção de água por capilaridade (cerca de 6%), menor permeabilidade ao vapor de água (redução de 16%) e secagem mais lenta, (redução na fase 1 cerca de 10% e na fase 2 cerca de 15%) quando comparada com a argamassa endurecida no molde.

Com esta campanha confirmou-se que o substrato tijolo cerâmico furado influencia as características da argamassa aplicada e aperfeiçoou-se a execução e destacamento dos provetes para o desenvolvimento dos restantes trabalhos da tese.

4.2. Caracterização dos substratos

Nesta seção são apresentados os valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos nos ensaios de caracterização dos substratos utilizados. A simbologia utilizada tem o seguinte significado: **PB**: Placa de betão; **BB**: Bloco de betão; **BBL**: Bloco de betão leve; **TM**: Tijolo maciço; **TF**: Tijolo furado.

4.2.1. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação para a massa volúmica aparente dos substratos são apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 Massa volúmica (kg/m³) dos substratos

Substratos	Média	DP	CV (%)
PB	2224	9,3	0,4
BB	2113	20,9	1,0
BBL	1319	71,5	5,4
TF	2071	12,7	0,6
TM	2059	32,1	1,6

Na tabela 4.6 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da porosidade aberta dos substratos.

Tabela 4.6 Porosidade aberta (%) dos substratos

Substratos	Média	DP	CV (%)
PB	11,5	0,4	3,5
BB	14,5	1,0	6,9
BBL	16,8	1,4	8,3
TF	16,5	1,5	8,9
TM	18,4	0,7	3,7

4.2.2. Absorção de água por capilaridade

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do coeficiente de absorção de água por capilaridade são apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 Resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade - A_w ((kg/(m². S^{0,5}))

Substratos	Média	DP	CV (%)
PB	0,023	0,0026	11,3
BB	0,332	0,0031	0,9
BBL	0,308	0,0210	6,8
TF	0,037	0,0043	11,6
TM	0,104	0,0230	22,1

4.2.3. Permeabilidade ao vapor de água

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água dos substratos são apresentados na tabela 4.8:

Tabela 4.8 Resultados do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água [δ (kg/(m.s.Pa))]

Substratos	Média	DP	CV (%)	μ
PB	0,329E-11	0,530E-12	16,1	59,19
BB	1,465E-11	1,054E-12	7,2	13,31
BBL	1,797E-11	4,371E-12	24,3	10,85
TF	0,397E-11	0,125E-12	3,2	49,18
TM	0,454E-11	0,311E-12	6,8	42,95

4.2.4. Porosimetria por intrusão de mercúrio

Na tabela 4.9 são apresentados os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para cada substrato, nomeadamente, a distribuição do volume intrudido de mercúrio por gama de dimensão de poros e o diâmetro médio dos poros.

Tabela 4.9 Distribuição do volume intrudido por diâmetro de poros (substratos)

Substrato	$0,025 < \varnothing < 0,01 \mu\text{m}$	$0,01 < \varnothing < 0,05 \mu\text{m}$	$0,05 < \varnothing < 10 \mu\text{m}$	$\varnothing > 10 \mu\text{m}$	Diâmetro médio dos poros (μm)
BB	0,02	0,12	0,03	0,04	0,076
BBL	0,00	0,56	0,30	0,18	0,120
PB	0,03	0,29	0,09	0,06	0,058
TF	0,00	0,08	0,88	0,03	0,166
TM	0,00	0,03	1,20	0,01	0,480

A figura 4.1 mostra a distribuição dos poros de todos os substratos.

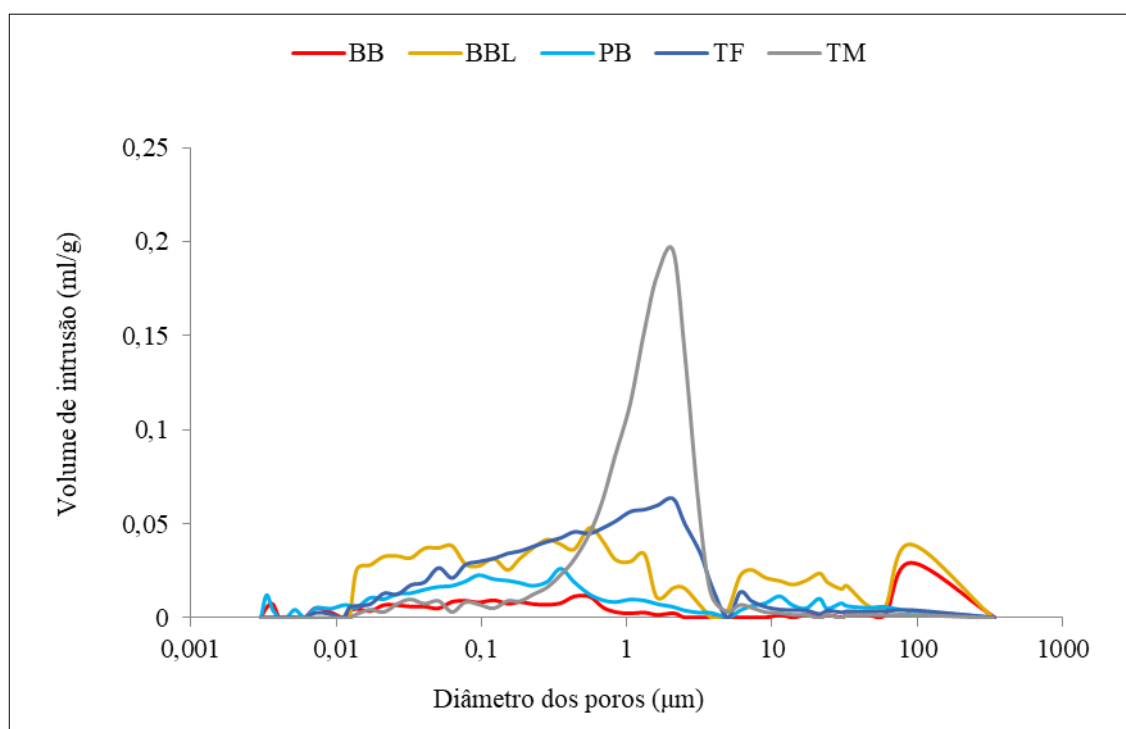


Figura 4.1 Distribuição dos poros dos substratos

4.2.5. Superfície de contacto

Em relação à superfície de contato do substrato com a argamassa, a partir de uma análise visual, através de fotografias e observações pela lupa estereoscópica, foi possível concluir que o bloco de betão leve apresenta uma superfície bastante irregular e bem diferente dos restantes substratos, existindo uma grande diferença de textura e rugosidade.

Porém, nota-se uma similaridade visual qualitativa entre os substratos cerâmicos (TF e TM) e os substratos de betão (PB e BB) (figuras 4.2 a 4.6).

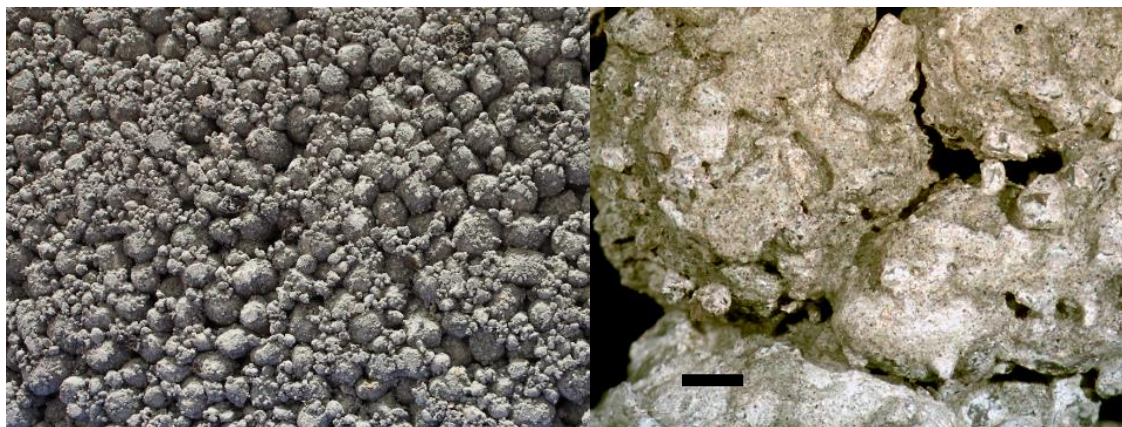


Figura 4.2 Bloco de betão leve - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm)

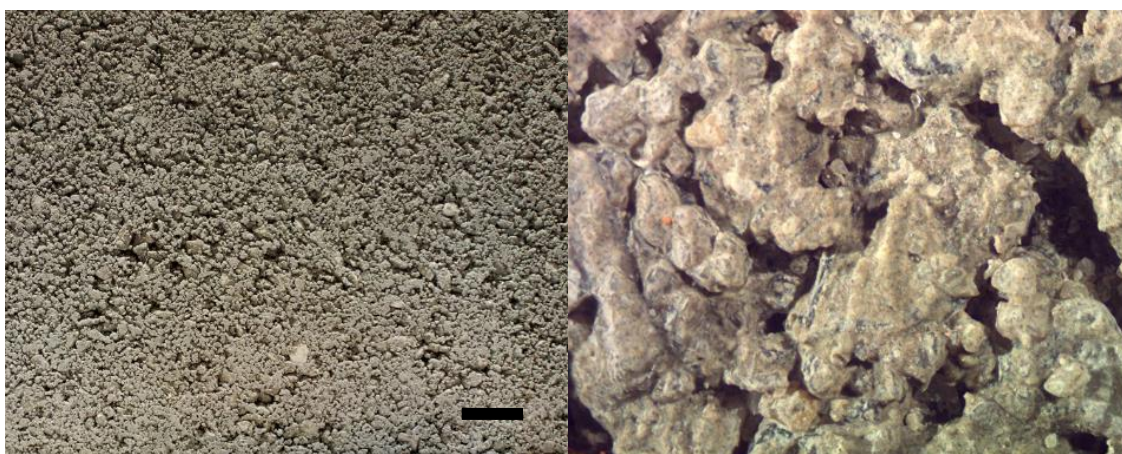


Figura 4.3 Bloco de betão - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm)

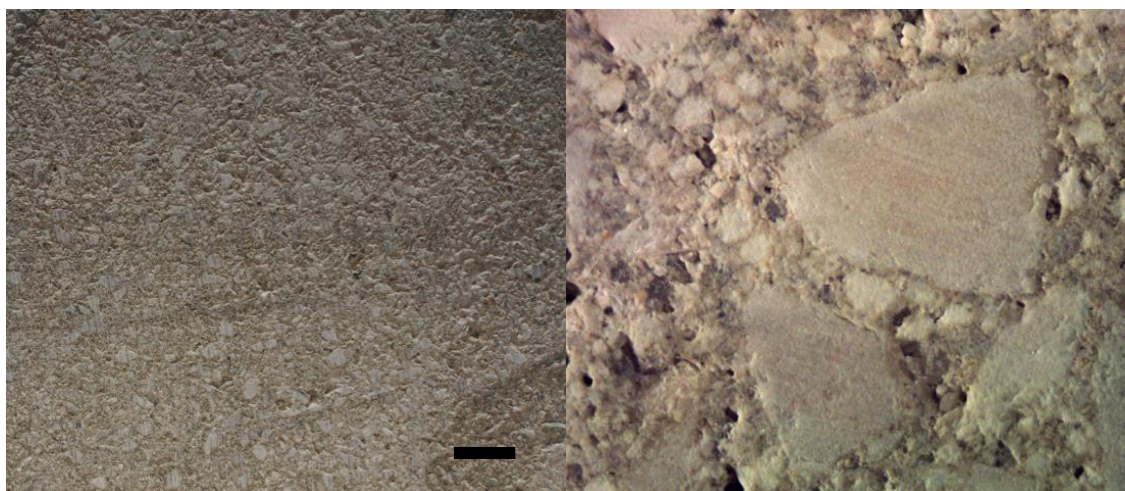


Figura 4.4 Placa de betão - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm)

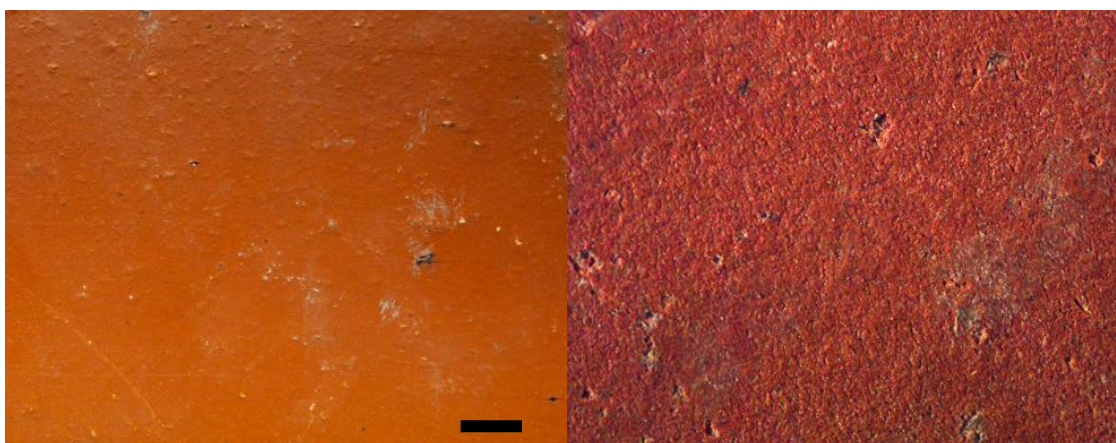


Figura 4.5 Tijolo cerâmico maciço - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm)

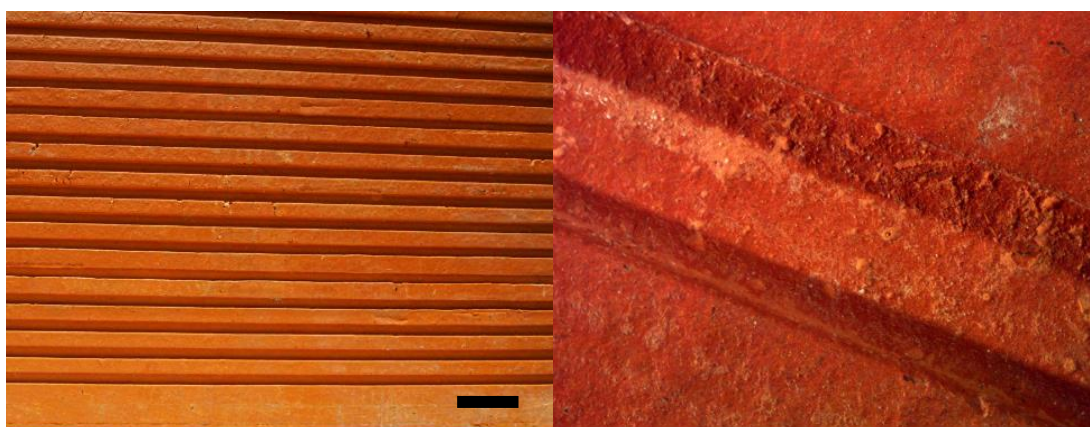


Figura 4.6 Tijolo cerâmico furado - fotografia (esq.); lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1mm)

4.3. Caracterização das argamassas

4.3.1. Argamassa no estado fresco

4.3.1.1. Consistência por espalhamento e massa volúmica no estado fresco

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para a consistência por espalhamento e para a massa volúmica no estado fresco foram 173,06 mm e 1570 kg/m³, respetivamente.

Refira-se que na produção da argamassa foi utilizado o valor médio de água da faixa sugerida pelo fabricante, ou seja, 4,5 litros de água por saco de argamassa.

Segundo a EN 1015-2 (CEN, 1998), para valores de massa volúmica >1200 kg/m³, o valor de espalhamento deve ser 175 ± 10 mm, o que se verificou.

4.3.2. Argamassa endurecida após 28 dias de cura

Nesta seção são apresentados os valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos para os provetes de argamassa endurecidos em moldes normalizados, relativos aos provetes prismáticos compatibilizados (MC - 4 x 4 x 1,5 cm³) e das argamassas endurecidas nos substratos e destacadas aos 28 dias de cura. Apresentam-se ainda os resultados obtidos para os ensaios realizados sobre as argamassas aplicadas nos substratos, isto é, sem destacamento das mesmas.

Os resultados dos provetes prismáticos (MP - 4 x 4 x 16 cm³) estão inseridos no anexo A.

As abreviaturas utilizadas significam: **MC**: argamassa moldada no molde prismático com dimensões compatibilizadas; **APB**: argamassa aplicada na placa de betão; **ABB**: argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL**: argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF**: argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM**: argamassa aplicada no tijolo maciço.

4.3.2.1. Massa volúmica aparente

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da massa volúmica aparente das argamassas endurecidas após 28 dias de cura são apresentados na tabela 4.10.

Tabela 4.10 Resultados da massa volúmica aparente (kg/m³) aos 28 dias

Argamassas	Média	Desvio padrão	CV (%)
MC	1365,42	7,31	0,54
ATF	1574,29	13,81	0,88
ATM	1570,25	13,18	0,84
APB	1528,28	16,64	1,09
ABB	1539,76	22,79	1,48
ABBL	1475,09	18,32	1,24

A massa volúmica da MC ($M = 1365,42$; $DP = 7,31$) ficou levemente abaixo do descrito pelo fabricante, a ABBL ($M = 1475,09$; $DP = 18,32$) ficou dentro do esperados, as demais obtiveram valores superiores ao descrito pelo fabricante (entre 1400 e 1500 kg/m³).

4.3.2.2. Porosidade aberta

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da porosidade aberta das argamassas aplicadas e destacadas do substrato são apresentados na tabela 4.11.

Tabela 4.11 Resultados da porosidade aberta (%) aos 28 dias

Argamassas	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
MC	28,25	0,56	1,98
ATF	22,13	0,88	3,97
ATM	22,47	0,60	2,68
APB	25,80	1,03	3,98
ABB	25,27	1,28	5,07
ABBL	30,28	0,61	2,02

4.3.2.3. Coeficiente de absorção por capilaridade

Apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para o coeficiente de absorção de água por capilaridade na tabela 4.12.

Tabela 4.12 Resultados do coeficiente de absorção por capilaridade ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$) aos 28 dias

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
MC	0,218	0,021	9,78
ATF	0,183	0,023	12,81
ATM	0,263	0,033	12,55
APB	0,161	0,015	9,17
ABB	0,174	0,032	18,17
ABBL	0,305	0,023	7,53

4.3.2.4. Índice de secagem

Na tabela 4.13 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação, obtidos para o índice de secagem.

Tabela 4.13 Resultados do índice de secagem aos 28 dias

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
MC	0,143	0,007	5,03
ATF	0,138	0,012	8,48
ATM	0,123	0,008	6,85
APB	0,135	0,012	8,80
ABB	0,155	0,014	9,06
ABBL	0,117	0,008	6,65

4.3.2.5. Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

Na tabela 4.14 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água.

Tabela 4.14 Resultados do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água aos 28 dias [δ (kg/(m.s.Pa))]

Argamassas	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)	μ
MC	1,86E-11	1,05E-12	5,65	10,48
ATF	2,13E-11	8,61E-13	4,04	9,15
ATM	2,07E-11	3,99E-13	1,92	9,41
APB	2,25E-11	2,48E-13	1,10	8,65
ABB	2,30E-11	6,67E-13	2,90	8,47
ABBL	2,37E-11	6,79E-13	2,86	8,22

Em relação à permeabilidade ao vapor de água, o resultado da resistência à difusão de vapor (μ) encontra-se conforme o esperado, para todas as argamassas, estando de acordo com o fabricante ($\mu < 35$).

4.3.2.6. Resistência à compressão

Na tabela 4.15 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação de resistência à compressão.

Tabela 4.15 Resultados da resistência à compressão (MPa) aos 28 dias

Argamassas	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
MC	2,56	0,12	4,51
ATF	4,96	0,70	14,07
ATM	6,27	0,66	10,59
APB	3,94	0,51	12,89
ABB	3,97	0,44	11,19
ABBL	3,99	0,35	8,79

Os valores de resistência à compressão obtidos encontram-se de acordo com as características estabelecidas pelo fabricante ($R_c > 1,35$ MPa).

4.3.2.7. Resistência adesiva

A execução do ensaio de resistência adesiva não correu como esperado para todas as situações (argamassa endurecida nos substratos aos 28 dias, envelhecimento acelerado e cura exterior).

Os provetes não ficaram adequadamente cortados até ao substrato o que poderá ter influenciado o resultado obtido. Porém, apesar de ser uma propriedade importante, não é uma característica fundamental para o objetivo da tese, que procura comparar as características da argamassa endurecida nos substratos com as características da argamassa caracterizada em moldes laboratoriais.

Os resultados obtidos estão inseridos nos anexos A, B e C.

4.3.2.8. Módulo de elasticidade por velocidade de propagação de ondas ultrassónicas

Na tabela 4.16 apresenta-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do módulo de elasticidade dinâmico obtidos por meio da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas (pundit).

Tabela 4.16 Resultados do módulo de elasticidade (GPa) aos 28 dias

Argamassas	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
MC	2,90	0,20	6,89
ATF	3,96	0,16	4,04
ATM	4,53	0,33	7,28
APB	2,67	0,13	4,87
ABB	3,60	0,02	0,55
ABBL	3,09	0,32	10,35

4.3.2.9. Absorção de água sob baixa pressão

Na tabela 4.17 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do ensaio de permeabilidade à água líquida por meio dos tubos de Karsten referente às argamassas aplicadas em cada substrato, aos 28 dias de cura.

Tabela 4.17 Resultados da permeabilidade à água líquida ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$) aos 28 dias

Argamassas	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF	2,23	0,065	2,90
ATM	1,58	0,102	6,45
APB	1,13	0,028	2,45
ABB	1,41	0,083	5,87
ABBL	1,30	0,092	7,14

4.3.2.10. Porosimetria por intrusão de mercúrio

Na tabela 4.18 e na figura 4.7 são apresentados os resultados obtidos para a porosimetria por intrusão de mercúrio das argamassas endurecidas aos 28 dias.

Tabela 4.18 Resultado da distribuição do volume intrudido por diâmetro de poros

Argamassa	$0,025 < \emptyset < 0,01$ μm	$0,01 < \emptyset < 0,05$ μm	$0,05 < \emptyset < 10$ μm	$\emptyset > 10$ μm	Diâmetro médio dos poros (μm)
MC	0,075	0,602	1,220	1,383	0,161
ABB	0,026	0,409	1,231	0,816	0,268
ABBL	0,054	0,425	1,113	0,913	0,184
APB	0,021	0,403	1,135	1,060	0,304
ATF	0,025	0,540	0,925	0,900	0,191
ATM	0,013	0,275	1,268	0,606	0,340

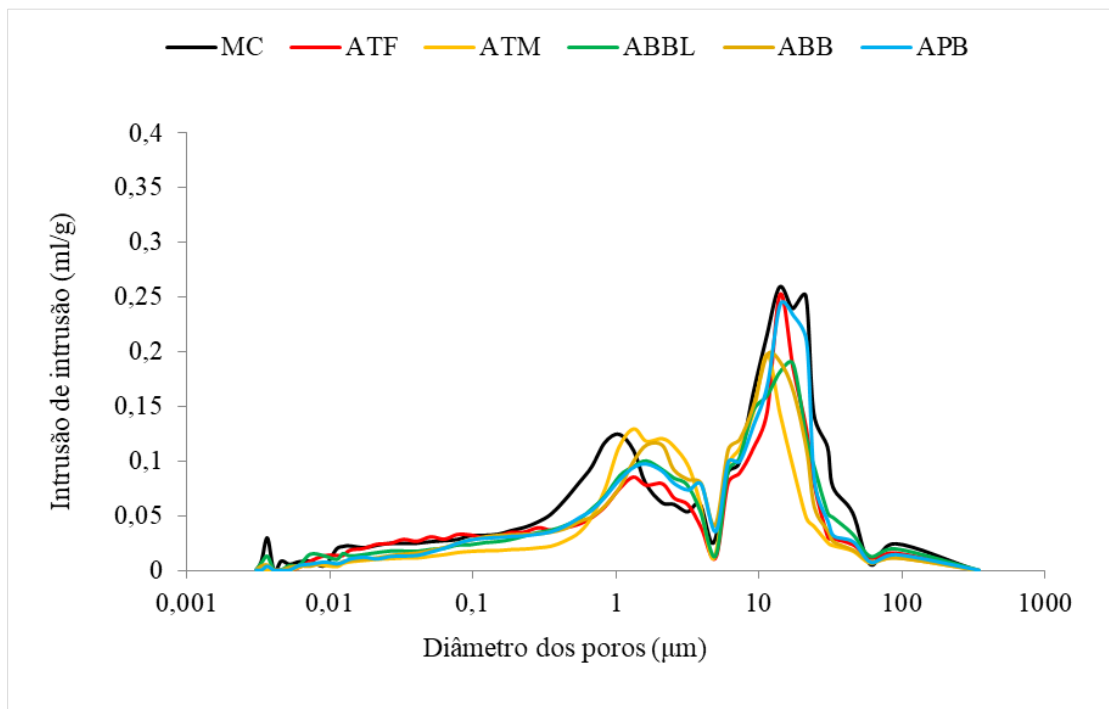


Figura 4.7 Distribuição dos poros das argamassas aos 28 dias

4.3.2.11. Análise a diferentes escalas de observação

Para melhor compreensão da microestrutura da argamassa endurecida no molde normalizado, foi realizada uma análise qualitativa a diferentes escalas de observação: fotografia, lupa estereoscópica, microtomografia de raios-X e microscópio eletrônico de varrimento (MEV). Para a microtomografia de raios-X procurou-se analisar uma secção média representativa do interior da amostra para todos os casos.

Em relação a zona de interface, foi possível perceber pela microtomografia de raios-X, que para todas as argamassas aplicadas, existe uma zona de transição 1-2 mm a partir do substrato. Essa zona de interface apresenta um perfil menos poroso, com possível aumento de ligante o que acarreta em sua densificação. A espessura da zona de interface bem como a redução da porosidade na mesma também foi observada por Sadowski et al. (2017).

- **Argamassa endurecida no molde normalizado (MC)**

As figuras que seguintes apresentam os resultados das observações por fotografia e lupa estereoscópica (figura 4.8), microscópio eletrônico de varrimento (figura 4.9) e microtomografia de raios-X (figura 4.10).

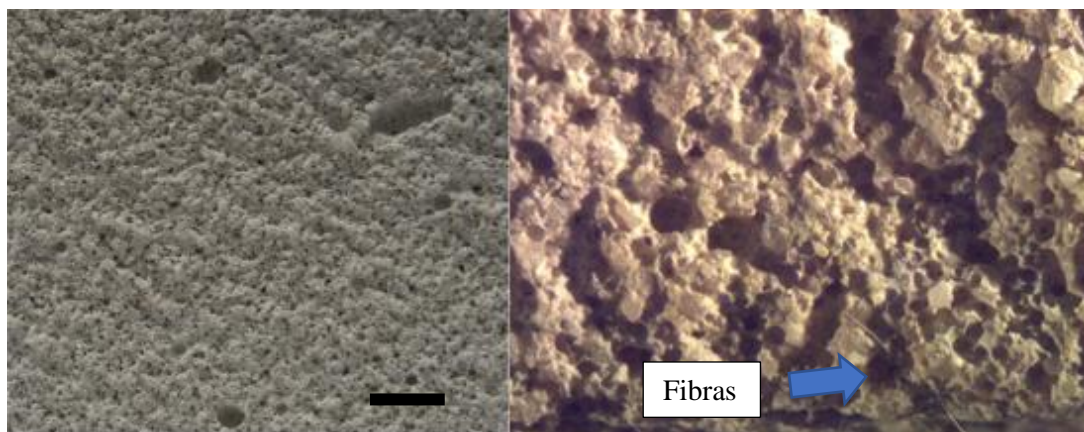


Figura 4.8 Argamassa endurecida no molde: Fotografia (esq.); Lupa estereoscópica (dir.) (Barra: 1 mm)

Foi possível notar a presença de fibras na formulação da argamassa, conforme indicado pelo fabricante, as fibras aparecem na lupa estereoscópica e em mais detalhe no MEV. As fibras utilizadas na formulação da argamassa não são especificadas pelo fabricante.

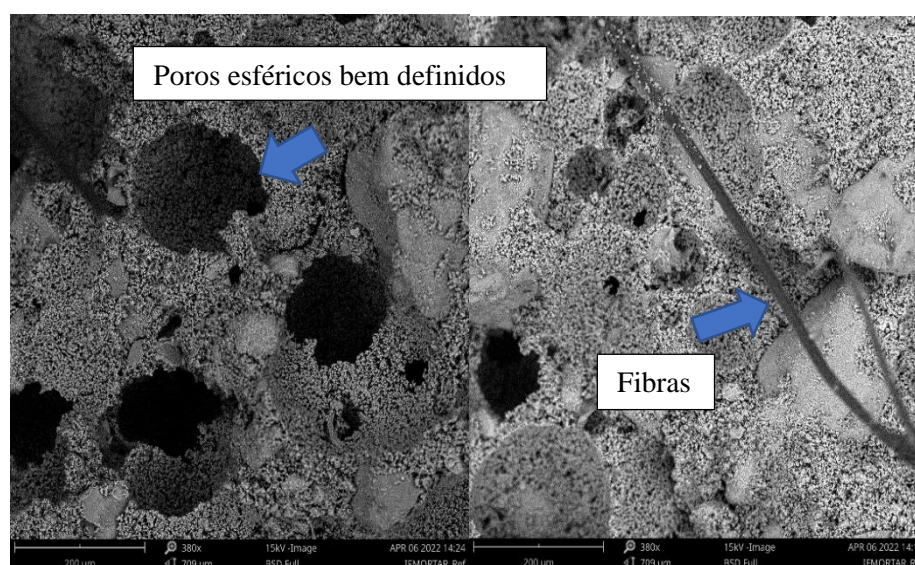


Figura 4.9 Argamassa endurecida no molde – MEV (Ampliação: 380x)

A argamassa possui uma porosidade bem distribuída ao longo de sua extensão, com poros bem definidos e em formato predominantemente esféricos. Esta situação é notada em todas as escalas de observação.

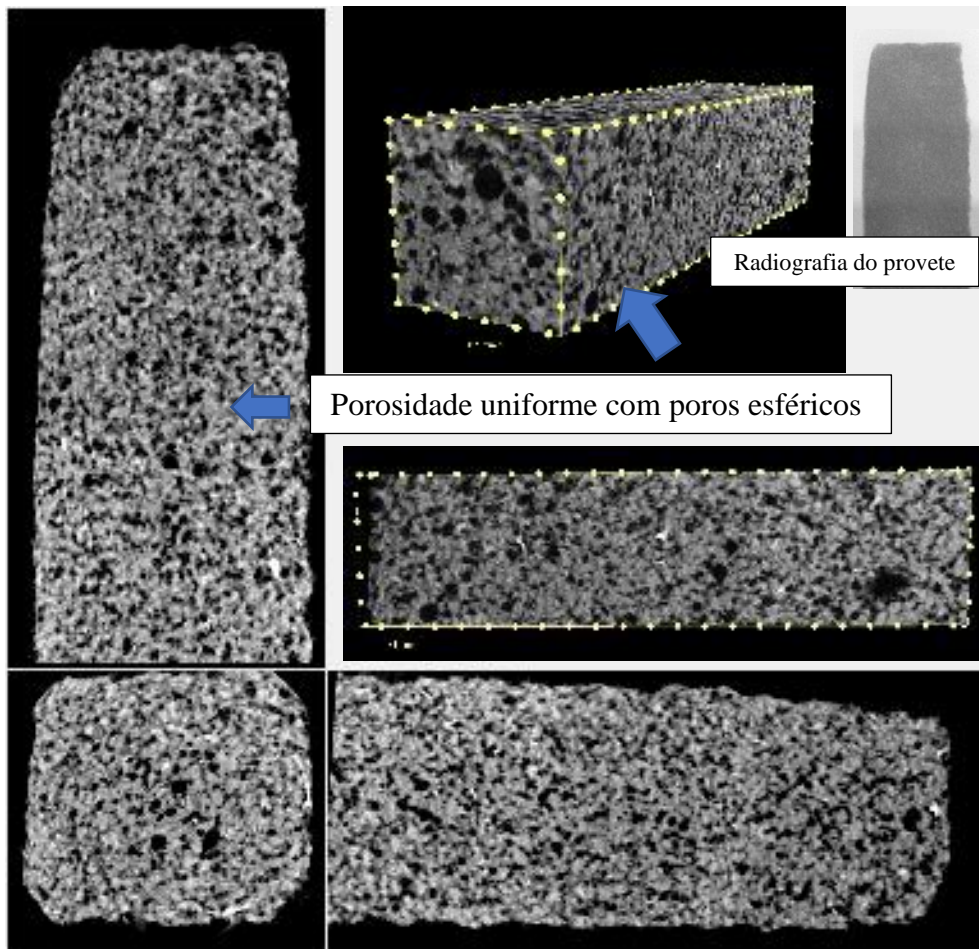


Figura 4.10 Argamassa endurecida no molde - microtomografia de raios-X (distância entre círculos amarelos: 1mm)

- **Argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ATF)**

As figuras 4.11 a 4.14 apresentam os resultados das observações por fotografia, lupa estereoscópica, microscópio eletrônico de varrimento e microtomografia de raios-X da argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado. É possível notar um aumento da porosidade com o afastamento da interface argamassa/substrato.

As caneluras do tijolo aparentam induzir uma menor compactação da argamassa. Este facto pode ser devido à dificuldade de exercer pressão no momento da aplicação, e por isso percebe-se a presença de vazios nessa área.

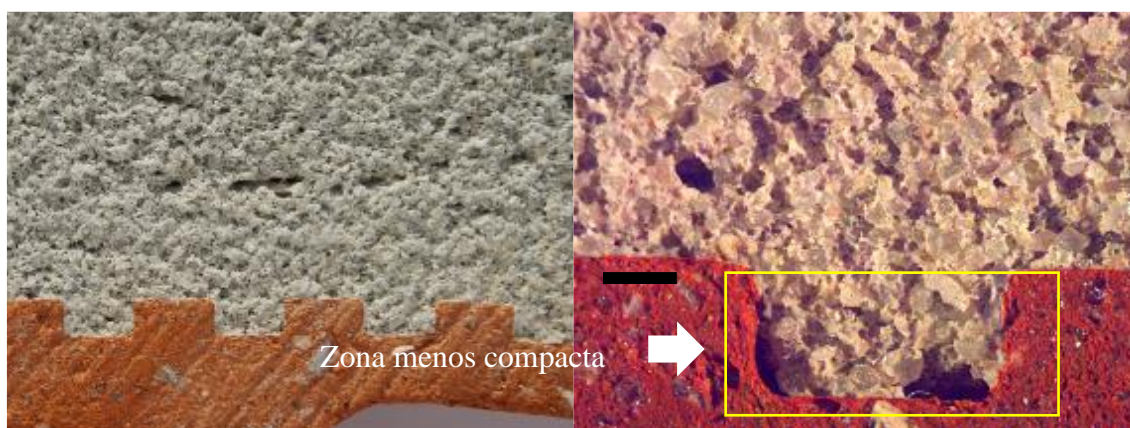


Figura 4.11 Argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ATF) - (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm)

Na Microtomografia de raios-X (figura 4.12) é possível notar a presença de regiões pretas, que representam os poros. As áreas brancas correspondem a partículas de agregados opacos de distribuição aleatória ou regiões enriquecidas com cimento.

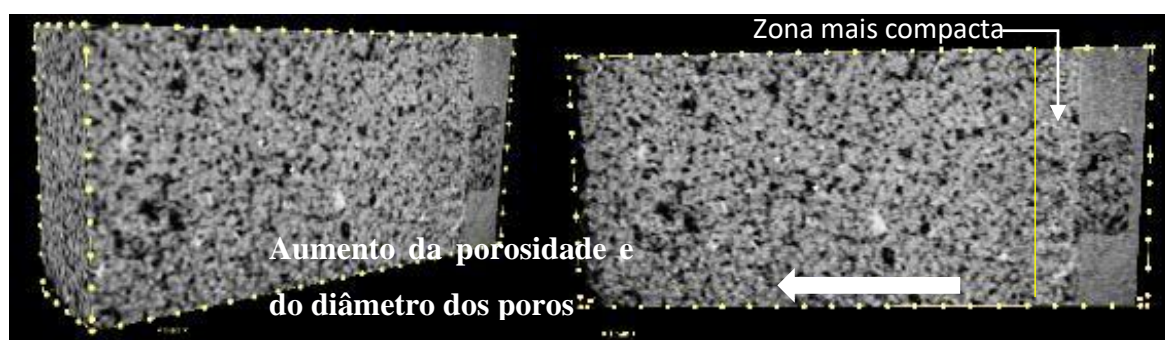


Figura 4.12 Microtomografia de raios-X da argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (distância entre círculos amarelo: 1mm)

Pelas imagens do MEV é possível confirmar a presença de uma camada mais fina junto ao substrato (figura 4.13 – dir) e a baixa compactação na canelura do tijolo furado (figura 4.13 – esq.) que acarreta numa maior presença de vazios nesta região.

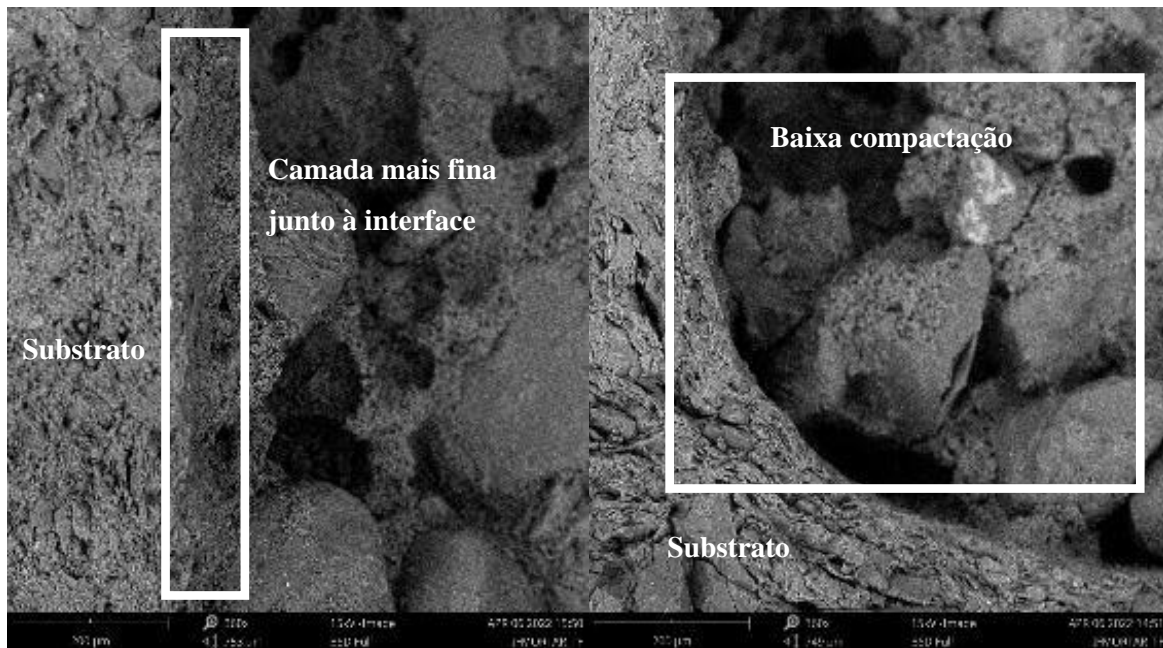


Figura 4.13 MEV - argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ampliação 380x)

Também é possível notar que os poros da argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado são mais irregulares (figura 4.14) do que os presentes na argamassa endurecida no molde.

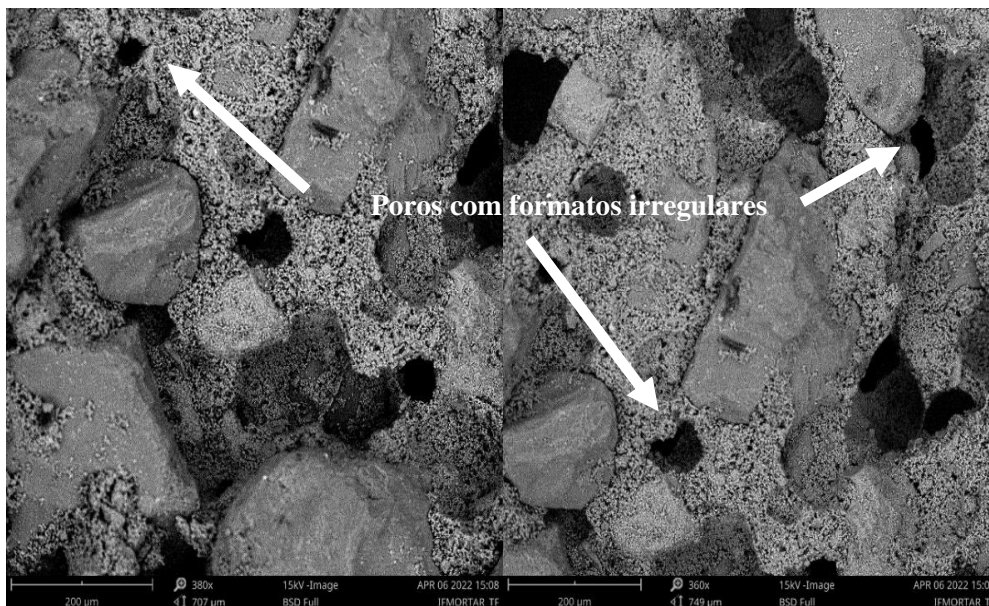


Figura 4.14 MEV - argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ampliação 380x – dir; 360x – esq.)

- **Argamassa aplicada no tijolo cerâmico maciço (ATM)**

Em relação à argamassa aplicada no tijolo cerâmico maciço é possível verificar que apresenta um resultado semelhante ao observado na argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado. Nos resultados das observações por fotografia, lupa estereoscópica nota-se um aumento da porosidade com o afastamento da interface e os poros com formato irregular (figura 4.15 e 4.17).

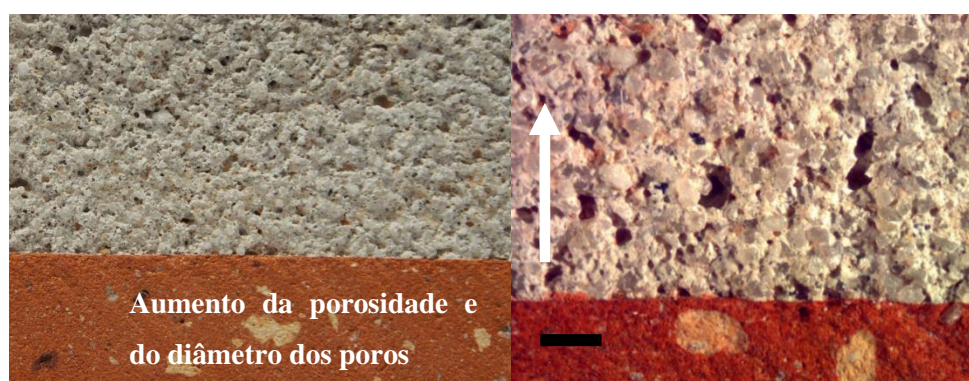


Figura 4.15 Argamassa aplicada no tijolo cerâmico maciço - (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm)

Pela imagem da microtomografia apresentada na figura 4.16 não é tão clara a redução da porosidade na zona de interface, porém pode-se observar um aumento do diâmetro dos poros indicado pela seta da imagem.

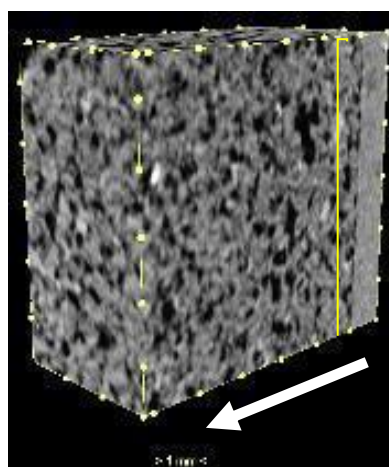


Figura 4.16 Microtomografia de raios-X argamassa aplicada no substrato tijolo cerâmico maciço (distância entre círculos amarelo: 1mm)

Com a imagem obtida do MEV (figura 4.17) nota-se de forma mais clara a irregularidade dos poros e a presença de material mais fino junto ao substrato, o que acarreta na sua densificação.

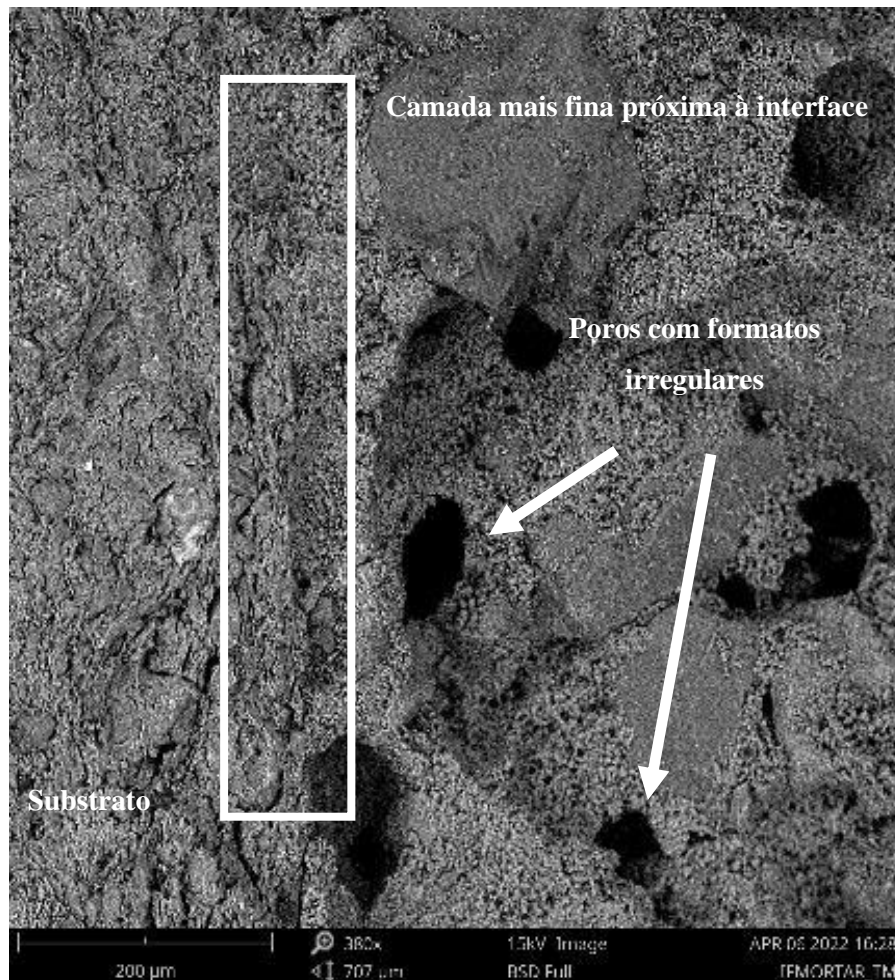


Figura 4.17 MEV - argamassa aplicada no tijolo cerâmico maciço (ampliação 380x)

- **Argamassa aplicada na placa de betão (APB)**

As figuras 4.18 a 4.20 apresentam os resultados obtidos por fotografia, lupa estereoscópica, microscópio eletrônico de varrimento e microtomografia de raios-X das observações realizadas para a argamassa aplicada na placa de betão.

Pode-se perceber que a zona de interface possui uma menor porosidade, que vai aumentando com o afastamento do substrato (figura 4.18 e figura 4.19).



Figura 4.18 Argamassa aplicada na placa de betão - (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm)

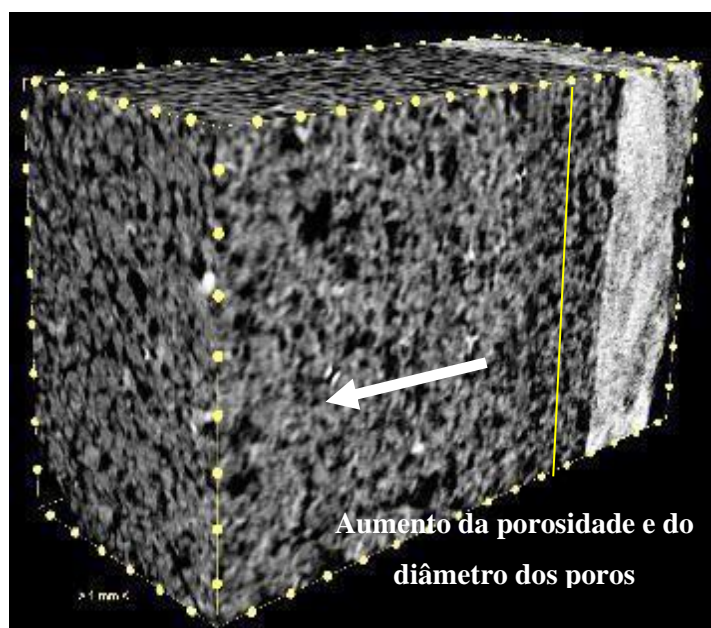


Figura 4.19 Microtomografia de raios-X argamassa aplicada na placa de betão (distância entre círculos amarelo: 1mm)

Nas observações com o MEV (figura 4.20) é possível notar uma camada mais fina junto ao substrato e a presença de poros irregulares como observado nos casos anteriores.

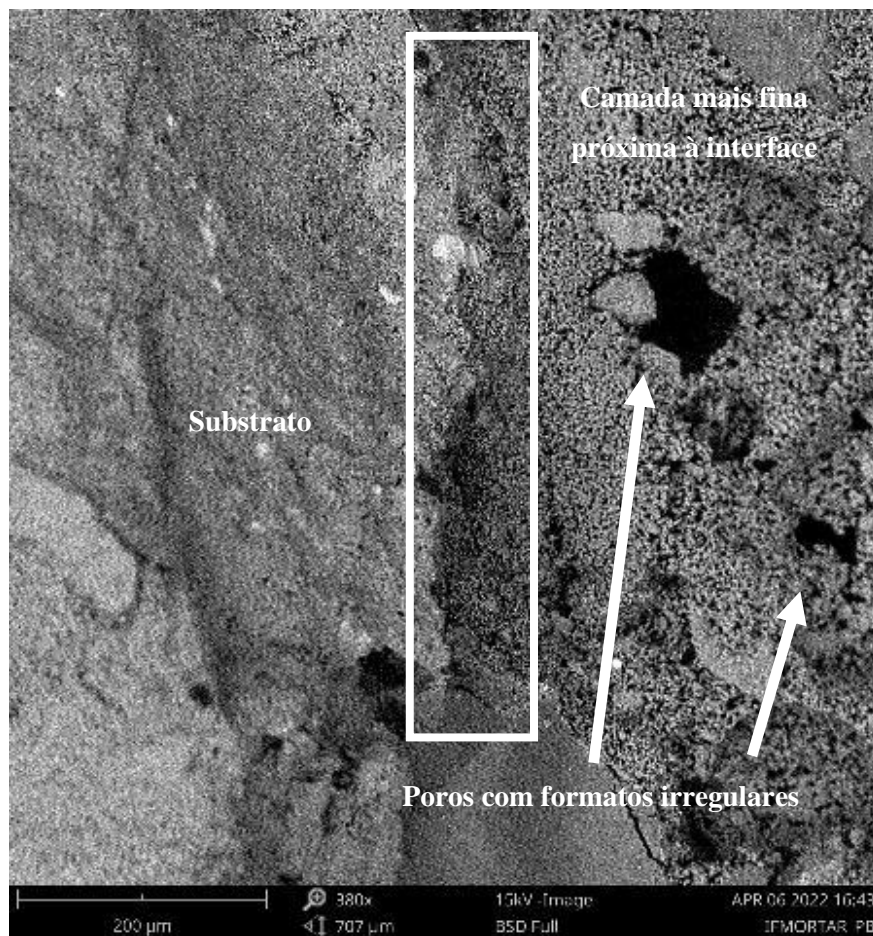


Figura 4.20 MEV - argamassa aplicada na placa de betão (ampliação 380x)

- **Argamassa aplicada no bloco de betão (ABB)**

As figuras 4.21 a 4.23 apresentam os resultados obtidos por fotografia, lupa estereoscópica, microscópio eletrônico de varrimento e microtomografia de raios-X das observações realizadas para a argamassa aplicada no bloco de betão.

Para a argamassa aplicada no bloco de betão pode-se notar que a argamassa não penetra de forma significativa nas reentrâncias da superfície do bloco (figura 4.21 e figura 4.22). Nota-se também um aumento da porosidade com o afastamento do substrato.



Figura 4.21 Argamassa aplicada ao bloco de betão – (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm)

Na imagem da microtomografia de raios-X fica claro uma maior densificação da interface, onde se pode observar uma linha branca junto ao substrato que pode significar uma região enriquecida de cimento.

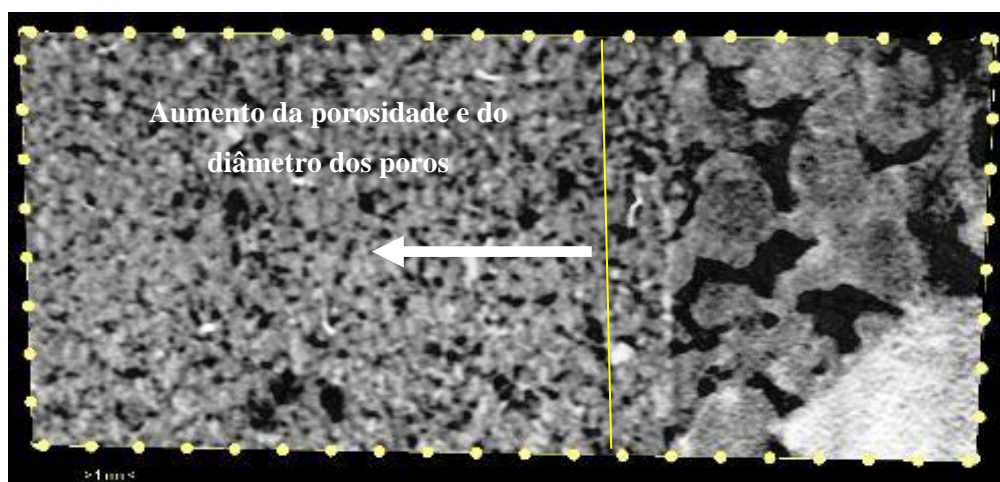


Figura 4.22 Microtomografia de raios-X argamassa aplicada no substrato bloco de betão (distância entre círculos amarelo: 1mm)

Nas observações com o MEV (figura 4.23) percebe-se, como nos casos anteriores, poros com formato irregular.

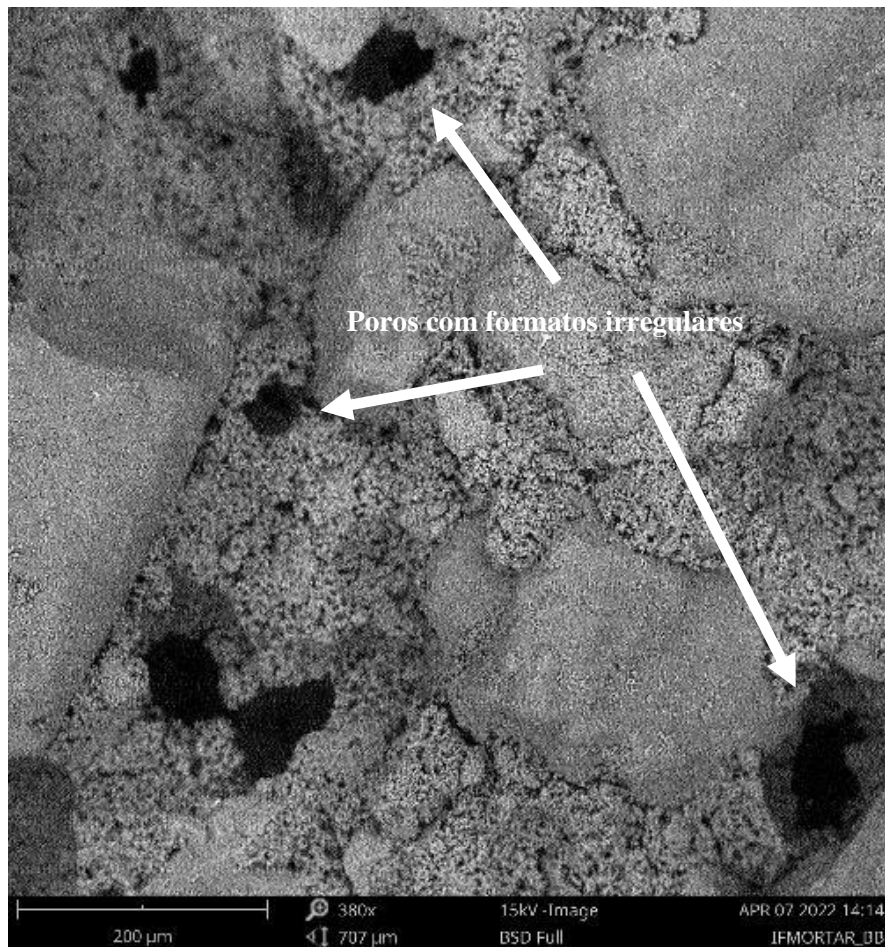


Figura 4.23 MEV - argamassa aplicada no substrato bloco de betão (ampliação: 380x)

- **Argamassa aplicada ao bloco de betão leve (ABBL)**

As figuras 4.24 a 4.27 apresentam os resultados obtidos por fotografia, lupa estereoscópica, microscópio eletrônico de varrimento e microtomografia de raios-X das observações realizadas para a argamassa aplicada no bloco de betão leve.

Na argamassa aplicada no bloco de betão, pode-se observar que as reentrâncias do bloco permitem a penetração da argamassa, porém, como no caso da canelura do tijolo cerâmico furado, esta zona aparenta ter baixa compactação (figura 4.24 e figura 4.25).

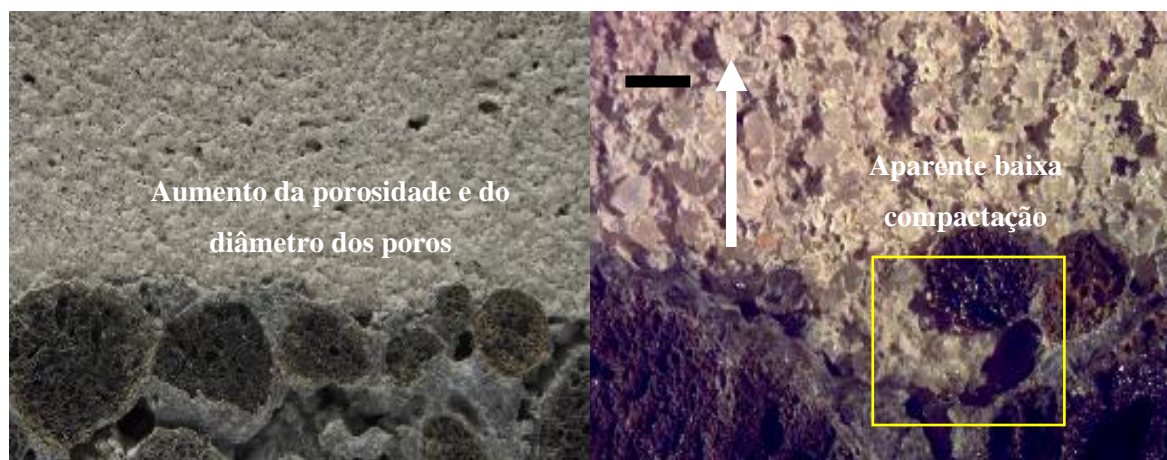


Figura 4.24 Argamassa aplicada na placa de betão leve - (dir.) Fotografia, (esq.) Lupa estereoscópica (barra: 1mm)

Como nos casos anteriores é possível perceber o aumento do diâmetro dos poros e a porosidade quando há um afastamento do substrato (figura 4.25).

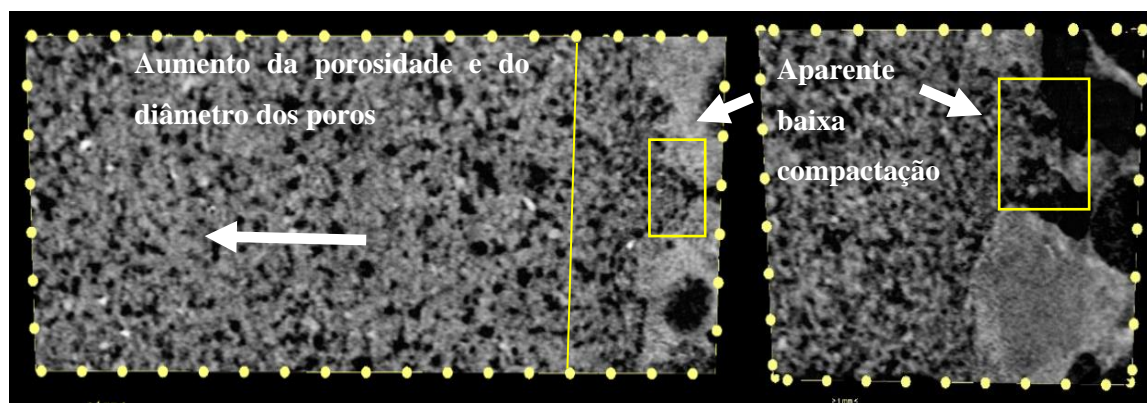


Figura 4.25 Microtomografia de raios-X argamassa aplicada no substrato bloco de betão leve (distância entre círculos amarelo: 1mm)

Nas figuras 4.26 e 4.27 é possível notar a presença de poros irregulares e a formação de uma camada mais fina junto ao substrato, como nos casos anteriores da argamassa aplicada.

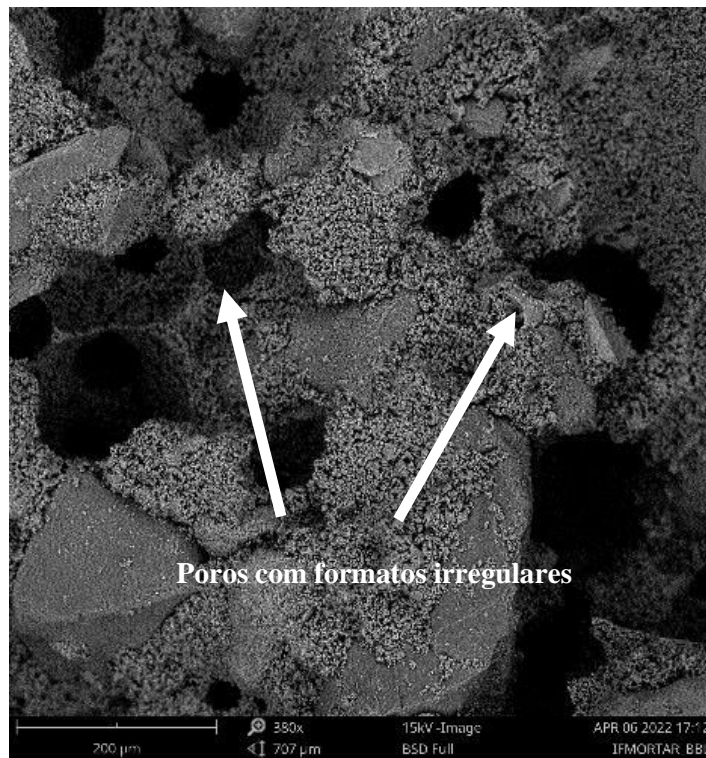


Figura 4.26 MEV - argamassa aplicada ao substrato bloco de betão leve (ampliação 380x)

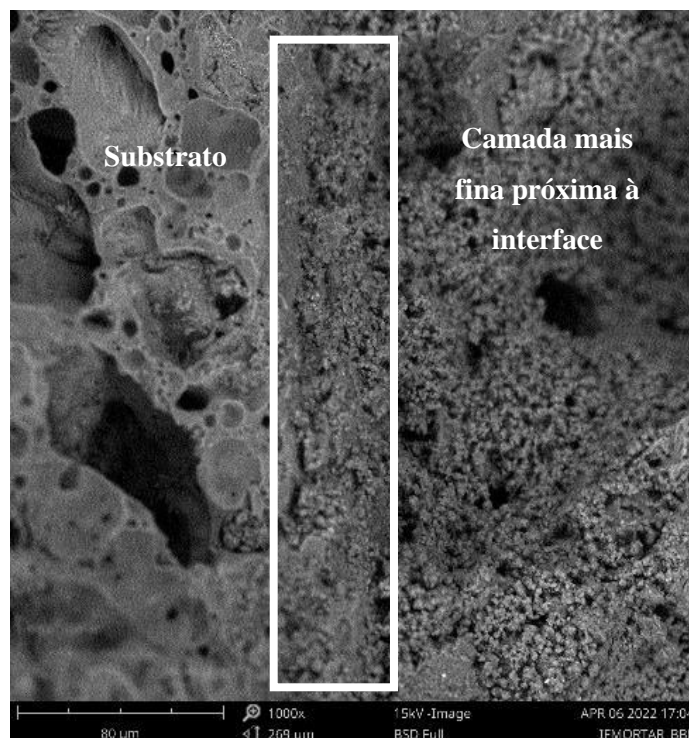


Figura 4.27 MEV - argamassa aplicada ao substrato bloco de betão leve (ampliação 1000x)

4.3.3. Argamassas destacadas dos substratos após envelhecimento acelerado e cura exterior (300 dias)

Nesta seção são apresentados os valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos para os ensaios realizados sobre os provetes das argamassas endurecidas nos substratos e destacadas após cura por envelhecimento acelerado e destacadas após cura de 300 dias em ambiente exterior. Apresentam-se ainda os resultados obtidos para os ensaios realizados sobre as argamassas aplicadas nos substratos, isto é, sem destacamento das mesmas.

As abreviações utilizadas para as argamassas destacadas após o envelhecimento acelerado significam: **APB EA**: argamassa aplicada na placa de betão; **ABB EA**: argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL EA**: argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF EA**: argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM EA**: argamassa aplicada no tijolo maciço.

Para as argamassas destacadas após 300 dias de cura no exterior, tem-se: **APB CE**: argamassa aplicada na placa de betão; **ABB CE**: argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL CE**: argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF CE**: argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM CE**: argamassa aplicada no tijolo maciço.

4.3.3.1. Massa volúmica aparente

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para a massa volúmica aparente das argamassas aplicadas e destacadas do substrato após o envelhecimento acelerado são apresentados na tabela 4.19.

Tabela 4.19 Massa volúmica (kg/m³) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF EA	1610,13	16,55	1,03
ATM EA	1663,58	23,08	1,39
APB EA	1564,64	21,08	1,35
ABB EA	1556,46	11,61	0,75
ABBL EA	1592,42	21,71	1,36

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da massa volúmica aparente das argamassas aplicadas e destacadas dos substratos após 300 dias de cura em ambiente exterior, são apresentados na tabela 4.20.

Tabela 4.20 Massa volúmica (kg/m³) (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF CE	1558,18	34,98	2,24
ATM CE	1561,96	25,94	1,66
APB CE	1509,19	44,75	2,97
ABB CE	1497,32	10,13	0,68
ABBL CE	1505,78	11,93	0,79

4.3.3.2. Porosidade Aberta

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da porosidade aberta das argamassas aplicadas e destacadas dos substratos após envelhecimento acelerado são apresentados na tabela 4-21.

Tabela 4.21 Porosidade aberta (%) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF EA	21,14	0,51	2,39
ATM EA	25,44	0,17	0,66
APB EA	26,94	0,89	3,29
ABB EA	27,68	0,67	2,40
ABBL EA	26,47	0,73	2,78

Os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da porosidade aberta das argamassas aplicadas e destacadas dos substratos após 300 dias no exterior são apresentados na tabela 4.22.

Tabela 4.22 Porosidade aberta (%) (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF CE	32,03	1,08	3,36
ATM CE	30,82	0,39	1,27
APB CE	32,50	0,91	2,80
ABB CE	32,47	0,36	1,10
ABBL CE	33,11	0,54	1,63

4.3.3.3. Coeficiente de absorção por capilaridade

Segundo a ISO 15148 (2002) foi determinada a quantidade de água absorvida por unidade de área e para cada intervalo de tempo. Apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para o coeficiente de absorção de água por capilaridade na tabela 4.23.

Tabela 4.23 Coeficiente de absorção por capilaridade ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

Argamassa	Média	Desvio padrão	CV (%)
ATF EA	0,296	0,022	7,29
ATM EA	0,163	0,020	12,53
APB EA	0,261	0,046	17,52
ABB EA	0,240	0,030	12,58
ABBL EA	0,264	0,036	13,62

Apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para o coeficiente de absorção de água por capilaridade após 300 dias de cura no exterior na tabela 4.24.

Tabela 4.24 Coeficiente de absorção por capilaridade ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$) (argamassas sujeitas à cura exterior – 300 dias)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF CE	0,269	0,011	3,91
ATM CE	0,271	0,025	9,40
APB CE	0,343	0,021	6,04
ABB CE	0,310	0,015	4,77
ABBL CE	0,347	0,018	5,20

4.3.3.4. Índice de secagem

Na tabela 4.25 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do índice de secagem das argamassas destacadas dos substratos após envelhecimento acelerado.

Tabela 4.25 Índice de secagem (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF EA	0,156	0,011	6,84
ATM EA	0,111	0,010	9,47
APB EA	0,113	0,007	5,78
ABB EA	0,114	0,005	4,77
ABBL EA	0,116	0,005	4,36

Na tabela 4.26 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do índice de secagem para a argamassa destacada dos substratos após 300 dias de cura no exterior.

Tabela 4.26 Índice de secagem (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF CE	0,144	0,009	6,45
ATM CE	0,123	0,011	8,95
APB CE	0,136	0,008	5,71
ABB CE	0,137	0,011	8,19
ABBL CE	0,135	0,006	4,25

4.3.3.5. Permeabilidade ao vapor de água

Na tabela 4.27 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água para as argamassas destacadas dos substratos após envelhecimento acelerado.

Tabela 4.27 Permeabilidade ao vapor de água (kg/(m.s.Pa)) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)	μ
ATF EA	2,11E-11	1,62E-12	7,68	9,22
ATM EA	2,19E-11	7,85E-14	0,36	8,91
APB EA	1,97E-11	2,65E-12	13,45	9,90
ABB EA	2,23E-11	1,22E-11	5,48	8,76
ABBL EA	2,14E-11	1,13E-12	5,27	9,13

Na tabela 4.28 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da permeabilidade ao vapor de água das argamassas aplicadas nos substratos submetidos a cura em ambiente exterior por 300 dias.

Tabela 4.28 Permeabilidade ao vapor de água (kg/(m.s.Pa)) (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)	μ
ATF CE	2,65E-11	3,85E-13	1,45	7,35
ATM CE	2,39E-11	1,34E-12	5,61	8,17
APB CE	2,76E-11	5,12E-13	1,86	7,06
ABB CE	2,69E-11	6,79E-13	2,52	7,25
ABBL CE	2,75E-11	7,26E-13	2,64	7,10

4.3.3.6. Resistência à compressão

Na tabela 4.29 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação de resistência à compressão para as argamassas destacadas dos substratos após envelhecimento acelerado.

Tabela 4.29 Resistência à compressão (MPa) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF EA	5,16	0,75	14,48
ATM EA	5,86	0,60	10,22
APB EA	3,69	0,38	10,23
ABB EA	3,76	0,16	4,14
ABBL EA	3,25	0,40	12,37

A tabela 4.30 apresenta-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação de resistência à compressão para as argamassas destacadas dos substratos após 300 dias de cura no exterior.

Tabela 4.30 Resistência à compressão (MPa) (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF CE	4,30	0,24	5,60
ATM CE	4,46	0,25	5,63
APB CE	3,26	0,76	23,42
ABB CE	3,77	0,27	7,20
ABBL CE	2,89	0,18	6,17

Cabe ressaltar que todos os valores (envelhecimento acelerado e cura exterior) estão de acordo com o fabricante $> 1,35$ MPa.

4.3.3.7. Porosimetria por intrusão de mercúrio

Na tabela 4.31 são apresentados os resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio para argamassa submetida ao envelhecimento acelerado. Na figura 4.28 é apresentada a distribuição dos poros.

Tabela 4.31 Distribuição do volume intrudido por diâmetro de poros (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

Argamassa	0,025 a 0,01 µm	0,01 a 0,05 µm	0,05 a 10 µm	> 10 µm	Diâmetro médio dos poros
ABB EA	0,000	0,443	1,036	0,737	0,33
ABBL EA	0,000	0,448	1,584	0,268	0,33
APB EA	0,000	0,416	1,500	0,343	0,35
ATF EA	0,004	0,364	1,375	0,515	0,35
ATM EA	0,002	0,360	1,291	0,440	0,33

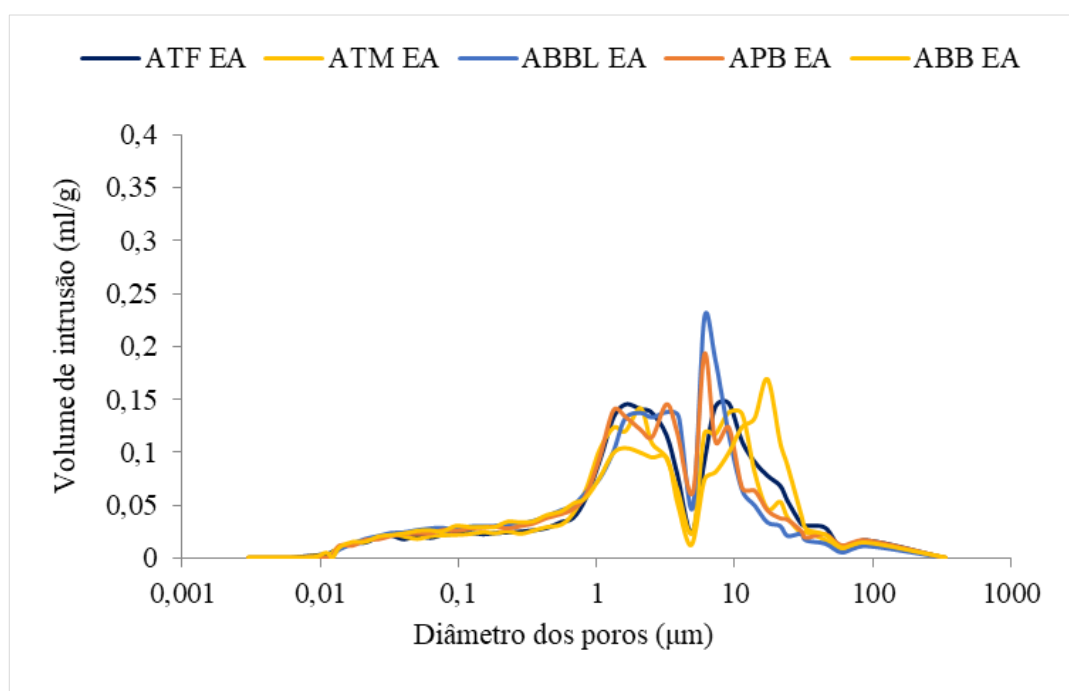


Figura 4.28 Distribuição dos poros - argamassas sujeitas a envelhecimento acelerado)

Na tabela 4.32 são apresentados os resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio para as argamassas submetidas aos 300 dias de cura no exterior.

Tabela 4.32 Distribuição do volume intrudido por diâmetro de poros (argamassas sujeitas à cura exterior – 300 dias)

Argamassa	0,025 a 0,01 μm	0,01 a 0,05 μm	0,05 a 10 μm	> 10 μm	Diâmetro médio dos poros
ABB CE	0,000	0,242	1,201	0,795	1,28
ABBL CE	0,000	0,444	1,171	0,881	0,42
APB CE	0,000	0,475	0,959	1,166	0,39
ATF CE	0,001	0,374	1,187	0,720	0,35
ATM CE	0,006	0,354	0,928	0,987	0,35

Na figura 4.29 é apresentada a distribuição dos poros.

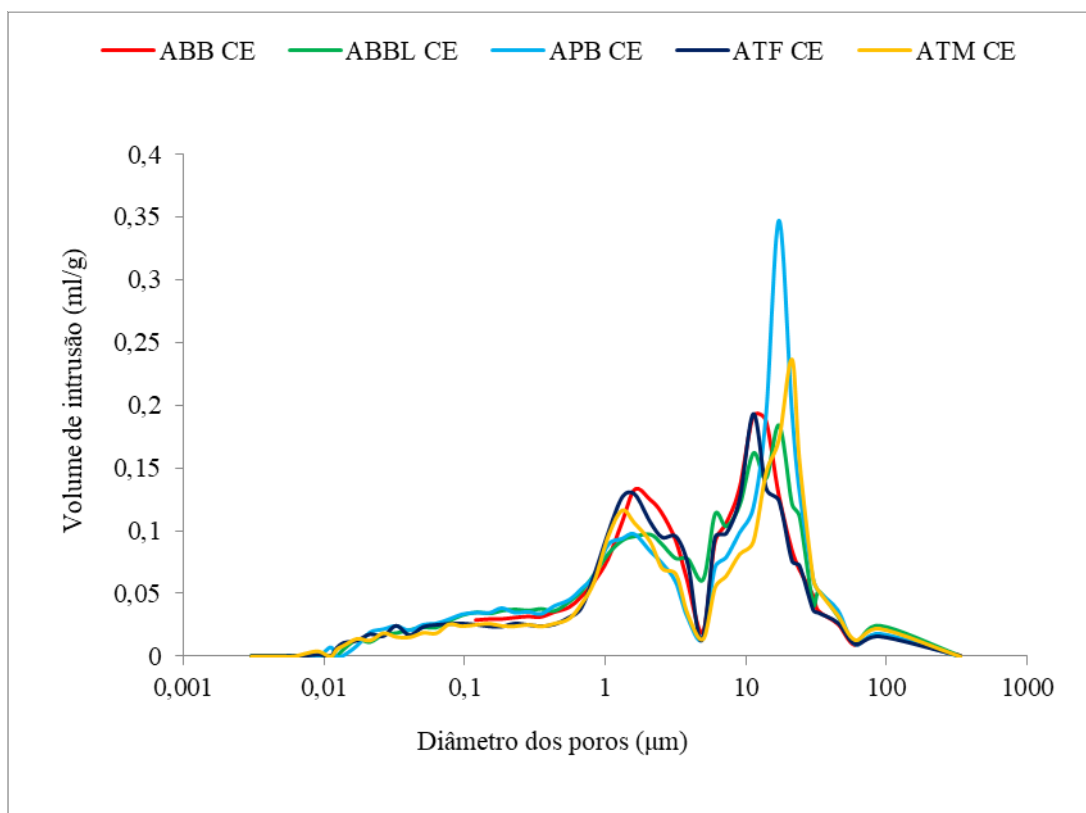


Figura 4.29 Distribuição dos poros - argamassas sujeitas à cura exterior (300 dias)

4.3.3.8. Módulo de elasticidade dinâmico

Apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico por meio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. A tabela 4.33 indica os valores médios obtidos para a argamassa destacada dos substratos após envelhecimento acelerado.

Tabela 4.33 Módulo de elasticidade dinâmico E (GPa) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF EA	3,79	0,03	0,79
ATM EA	3,50	0,66	0,19
APB EA	3,01	0,27	8,97
ABB EA	3,53	0,18	5,09
ABBL EA	3,26	0,14	4,29

Na tabela 4.34 apresenta-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para o módulo de elasticidade para as argamassas destacadas dos substratos após 300 dias de cura no exterior.

Tabela 4.34 Módulo de elasticidade dinâmico E (GPa) (argamassas sujeitas à cura exterior - 300 dias)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF CE	4,46	0,45	10,08
ATM CE	6,24	0,10	1,60
APB CE	3,76	0,01	0,27
ABB CE	3,90	0,59	15,13
ABBL CE	3,49	0,07	2,01

4.3.3.9. Absorção de água sob baixa pressão

Na tabela 4.35 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do ensaio de permeabilidade à água líquida por meio dos tubos de Karsten referente às argamassas aplicadas em cada substrato, após envelhecimento acelerado.

Tabela 4.35 Permeabilidade à água líquida ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$) (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF EA	2,131	0,166	7,81
ATM EA	1,268	0,111	8,75
APB EA	1,151	0,018	1,61
ABB EA	0,425	0,065	15,23
ABBL EA	0,837	0,185	22,10

Na tabela 4.36 apresentam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do ensaio de permeabilidade à água líquida por meio dos tubos de Karsten referente às argamassas aplicadas em cada substrato, com cura exterior.

Tabela 4.36 Permeabilidade à água líquida ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$) (Tubos de Karsten - argamassas sujeitas à cura exterior)

Argamassa	Valor médio	Desvio padrão	CV (%)
ATF CE	4,250	0,037	0,87
ATM CE	3,956	0,028	0,70
APB CE	5,198	0,046	0,89
ABB CE	5,688	0,166	2,93
ABBL CE	5,937	0,296	4,98

4.4. Síntese do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos (valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação) nos ensaios de caracterização das argamassas e substratos. No caso das argamassas endurecidas aos 28 dias de cura, apresentou-se também os resultados das fotografias macroscópicas, lupa estereoscópica, microtomografia de raios-X e microscópico eletrônico de varrimento. Para os substratos foram apresentados os resultados das fotografias macroscópicas e lupa estereoscópica.

Inicialmente, foram expressos os resultados das campanhas preliminares que tiveram como objetivo testar a metodologia experimental. Na primeira campanha, confirmou-se a não

influência, estatisticamente significativa, do uso da rede de fibra de vidro posicionada na interface argamassa/substrato. Na segunda campanha, confirmou-se a influência do substrato de tijolo cerâmico furado nas características da argamassa de cimento tradicional. Esta campanha também foi importante para o aperfeiçoamento da execução e destaque dos provetes moldados.

Em seguida, foram apresentados os resultados de caracterização dos substratos, nomeadamente em relação à massa volúmica aparente, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, porosimetria por intrusão de mercúrio e superfície de contacto, por meio de fotografias macroscópicas e lupa estereoscópica.

Por fim, foi caracterizada a argamassa no estado fresco, endurecida após 28 dias de cura (no molde metálico e endurecida nos substratos e posteriormente destacadas), endurecida nos substratos e posteriormente as amostras destacadas sujeitas ao envelhecimento acelerado e cura de 300 dias no exterior.

Foram apresentados os resultados da caracterização da argamassa em relação à massa volúmica, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, secagem, permeabilidade ao vapor de água, resistência à compressão, velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, absorção de água sob baixa pressão e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Para as argamassas endurecidas aos 28 dias foi realizada uma análise a diferentes escalas de observação com a utilização de fotografias macroscópicas, lupa estereoscópica, microtomografia de raios-X e microscópio eletrónico de varrimento.

A análise e discussão dos resultados são apresentadas no capítulo 5.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Substratos

5.2 Argamassas endurecidas aos 28 dias de cura

5.3 Argamassas endurecidas nos substratos com cura normal (28 dias) e sujeitas ao envelhecimento acelerado e à cura no exterior

5.4 Síntese do capítulo

5. Análise e discussão dos resultados

Neste capítulo é feita a análise e discussão dos resultados apresentados no capítulo 4. Esta análise tem início com os resultados obtidos para os ensaios realizados sobre os substratos, em seguida é feita a comparação entre os valores médios obtidos nos ensaios realizados sobre as argamassas endurecidas nos moldes metálicos e os valores médios obtidos para as argamassas endurecidas e destacadas dos substratos, após 28 dias de cura, com o objetivo de avaliar a influência dos substratos nas características da argamassa.

Posteriormente, comparam-se os valores obtidos para os ensaios realizados sobre a argamassa endurecida aos 28 dias, com os valores alcançados para as argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado e ainda com os valores obtidos para as argamassas expostas a 300 dias de cura no exterior, com o propósito de analisar se a tendência de influência encontrada se mantém ao longo do tempo.

5.1. Substratos

A simbologia utilizada nesta seção permanece conforme os capítulos anteriores:

- **Substratos:** **PB:** Placa de betão; **BB:** Bloco de betão; **BBL:** Bloco de betão leve; **TM:** Tijolo maciço; **TF:** Tijolo furado.

Os substratos foram caracterizados em relação à massa volúmica, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e porosimetria por intrusão de mercúrio. Os resultados encontrados (capítulo 4) para todos os ensaios de caracterização possuem um coeficiente de variação menor do que 30%. Portanto, a média possui grande significado (Falco, 2016).

Relativamente a massa volúmica e a porosidade aberta o bloco de betão leve (BBL), com argila expandida na sua composição, possui massa volúmica inferior aos outros substratos (uma redução aproximada de 40% em relação aos outros substratos de betão e 36% aos substratos cerâmicos) e uma porosidade aberta (BBL = 16,8%) próxima dos substratos cerâmicos (TM = 18,3 e TF = 16,5%).

Verificou-se que substratos com maior massa volúmica (PB e BB) possuem menor porosidade aberta e que os substratos de betão (PB e BB) e os substratos cerâmicos (TF e TM) possuem valores com a mesma ordem de grandeza entre si para a massa volúmica e porosidade aberta (figura 5.1).

A ordem de grandeza dos valores também foi observada por Torres (2014) (placa de betão: massa volúmica = 2247 kg/m³, porosidade aberta 12,63%; tijolo cerâmico: massa volúmica = 2026 kg/m³, porosidade aberta = 19,1%), Soares (2021) (tijolo maciço: massa volúmica = 2071 kg/m³, porosidade aberta = 18,33%; pedra natural: massa volúmica = 2427 kg/m³, porosidade aberta = 8,55%) e Torres et al. (2021) (tijolo cerâmico maciço: massa volúmica = 1976 kg/m³, porosidade aberta 20,9%; pedra natural: massa volúmica = 2407 kg/m³, porosidade aberta = 9,1%).

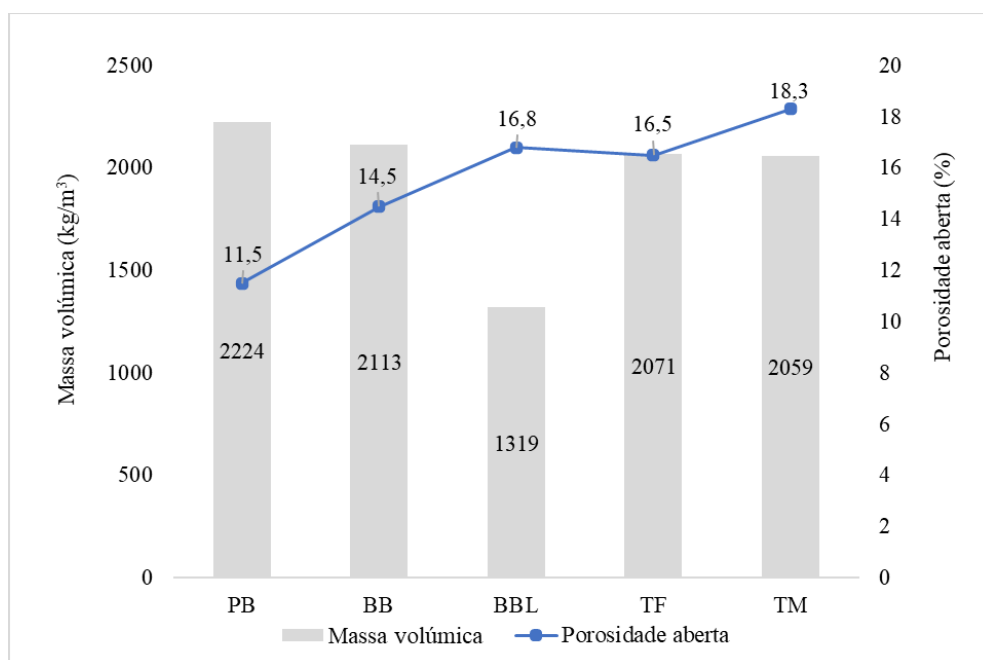


Figura 5.1 Massa volúmica e porosidade aberta dos substratos (valores médios)

Em relação ao coeficiente de absorção de água por capilaridade (figura 5.2), os substratos bloco de betão e bloco de betão leve obtiveram os maiores valores para os coeficientes de absorção de água por capilaridade ($A_w = 0,332 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ e $0,308 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$).

Gummerson et al. (1980) apud Caraek (1996) indicam o substrato de betão com agregado leve como tendo maior poder de absorção de água que o tijolo cerâmico e o bloco de betão. Além de uma variabilidade do coeficiente de absorção de água para o tijolo cerâmico (0,32 a 2,72 mm. min^{0,5}). Torres (2014) encontrou um coeficiente de absorção de água para o tijolo cerâmico furado ($A_w = 0,0259 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$) superior ao encontrado para a placa de betão ($A_w = 0,00527 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$).

O que indica que existe uma variabilidade entre os tipos de substratos e entre fabricantes. Tal fato limita a extrapolação dos resultados caso sejam considerados substratos de fabricantes diferentes.

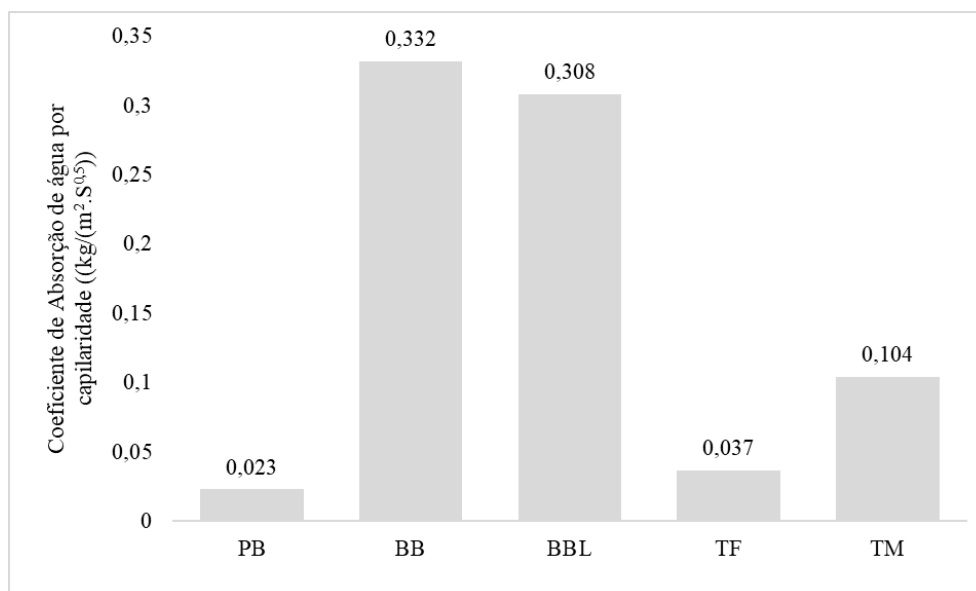


Figura 5.2 Coeficiente de absorção de água dos substratos (valores médios)

Apesar dos valores do coeficiente de absorção apresentados, importa analisar as curvas de absorção dos diferentes substratos.

É possível verificar que os substratos BB, BBL (figura 5.3) atingem a saturação antes dos substratos cerâmicos (TM e TF) e PB. Esta diferença de tempo até à saturação também foi observada por Torres (2014) e Bernardo et al. (2019).

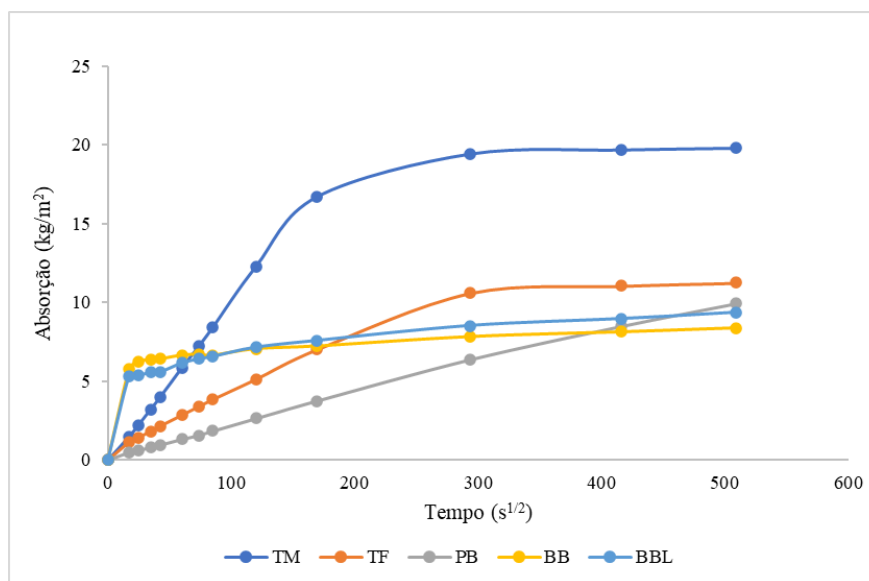


Figura 5.3 Curvas de absorção de água por capilaridade dos substratos

Bernardo et al. também indicam uma relação entre o tempo de saturação e o coeficiente de absorção. Logo, quanto maior o coeficiente de absorção por capilaridade, menor o tempo de saturação. Tendo observado o tempo de saturação para o tijolo cerâmico de 4 horas e para o bloco de betão de 15 min.

Uma possível interpretação para o fato do bloco de betão absorver uma quantidade significativa de água nos momentos iniciais baseia-se na distribuição geral de seus poros e sua interligação. O bloco cerâmico, por sua vez, apesar da elevada força de sucção capilar que os poros menores possuem (entre 0,01 e 0,05 μm), a quantidade de água inicialmente absorvida é baixa, o que leva a afirmar que a distribuição de seus poros é responsável pelo bloco cerâmico absorver água em tempos mais longos, em relação ao bloco de betão, conforme confirmado no estudo do Paes (2004).

Portanto, no que diz respeito ao mecanismo de transporte de água envolvendo diferentes substratos porosos, as propriedades dos materiais constituintes são muito distintas e relevantes para o fenômeno em questão (Paes et al., 2003).

Para a permeabilidade ao vapor de água (figura 5.4) os substratos BB e BBL apresentaram a maior permeabilidade ao vapor de água ($1,47\text{E-}11$ kg/(m.s.Pa) e $1,56\text{E-}11$ kg/(m.s.Pa)) em comparação com os outros substratos.

Os substratos cerâmicos (TF e TM) apresentaram valores com a mesma ordem de grandeza e valores superiores a PB. Este fato também foi observado por Torres (2014) (PB = $1,93\text{E}-12$ kg/(m.s.Pa) e TF = $2,31\text{E}-12$ kg/(m.s.Pa)).

Era esperado que os substratos mais porosos possuíssem uma maior permeabilidade ao vapor de água. Isso não foi confirmado em relação à BB que possui uma porosidade aberta menor do que os outros substratos, porém atingiu valores superiores de permeabilidade ao vapor de água.

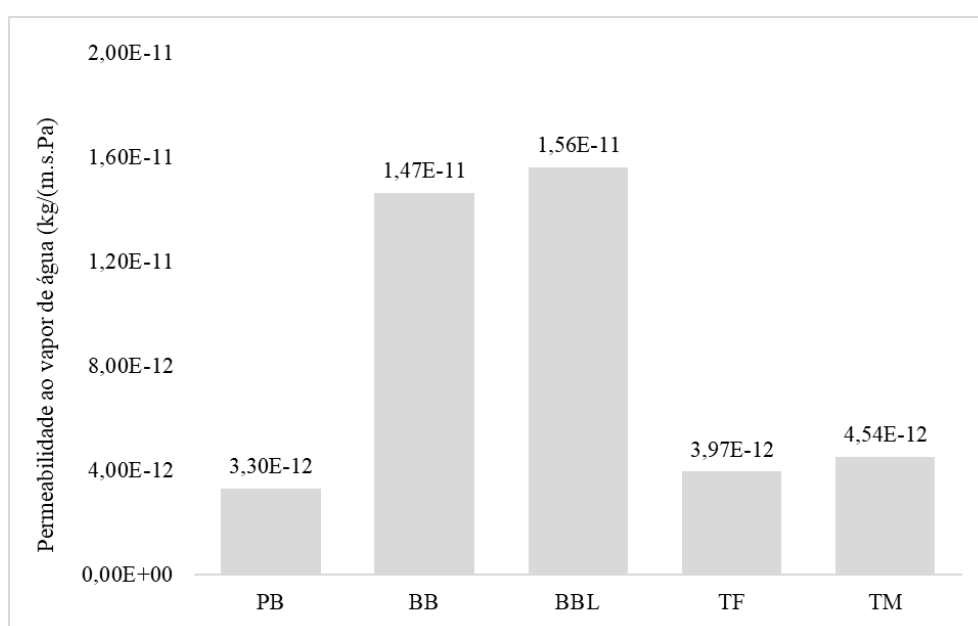


Figura 5.4 Permeabilidade ao vapor de água dos substratos (valores médios)

Com o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi possível verificar a distribuição dos diâmetros dos poros por tipo de substrato. A quantidade de poros por faixa de influência, fornece informações relevantes para a compressão do comportamento do material (Pipilikaki e Beazi-katsioti, 2009).

Em relação aos substratos cerâmicos (figura 5.5), TF possui maior quantidade de poros menores que $1\ \mu\text{m}$ quando comparado com TM, que apresenta o pico de poros entre $1\ \mu\text{m}$ e $10\ \mu\text{m}$.

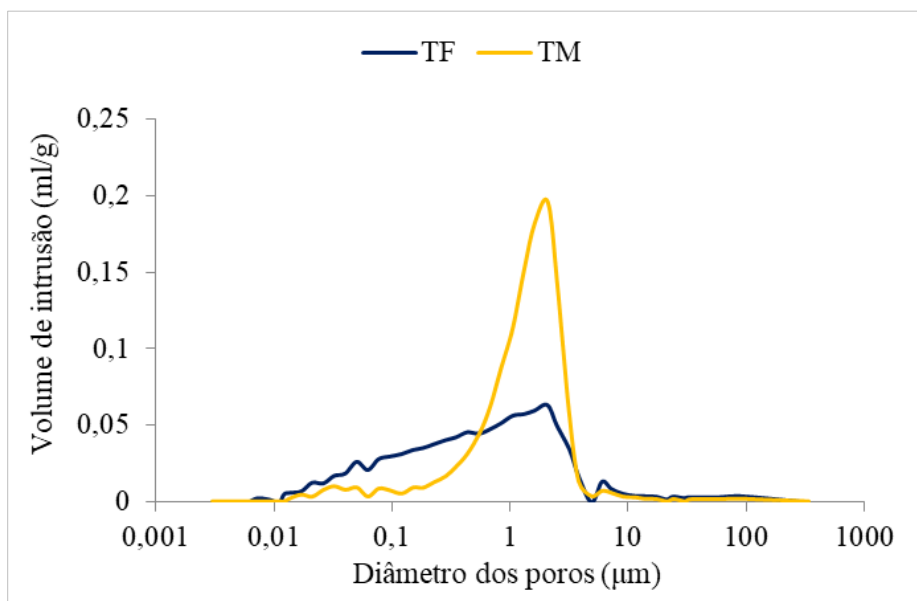


Figura 5.5 Substratos - distribuição dos poros (TF e TM)

Pode-se observar que TM possui mais poros na faixa de influência capilar ($0,05 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$) (TM = 1,20 ml/g e TF = 0,88 ml/g). Esta situação justifica a maior capacidade de absorção de água por capilaridade de TM em relação a TF (figura 5.2).

Para permeabilidade ao vapor de água, apesar de TF possuir maior quantidade de poros na faixa de influência ($0,01$ a $0,05 \mu\text{m}$ e $>10 \mu\text{m}$) do que TM, o maior diâmetro de poros de TM ($0,480 \mu\text{m}$) em relação a TF ($0,166 \mu\text{m}$) e a maior porosidade aberta (tabela 5.1) tornou TM ligeiramente mais permeável ao vapor de água.

Tabela 5.1 TF e TM - Distribuição dos poros e porosidade aberta

Substrato	0,01 a 0,05 μm e $>10 \mu\text{m}$ (ml/g)	Porosidade aberta (%)	Diâmetro médio dos poros (μm)
TF	0,11	16,5	0,166
TM	0,05	18,3	0,480

Na análise de distribuição dos poros dos substratos de betão (figura 5.6), BB e BBL possuem quantidade de poros acima de $10 \mu\text{m}$ maior do que os demais substratos. O que confirma a menor resistência ao vapor de água (maior facilidade de secagem), apesar da menor porosidade aberta de BB.

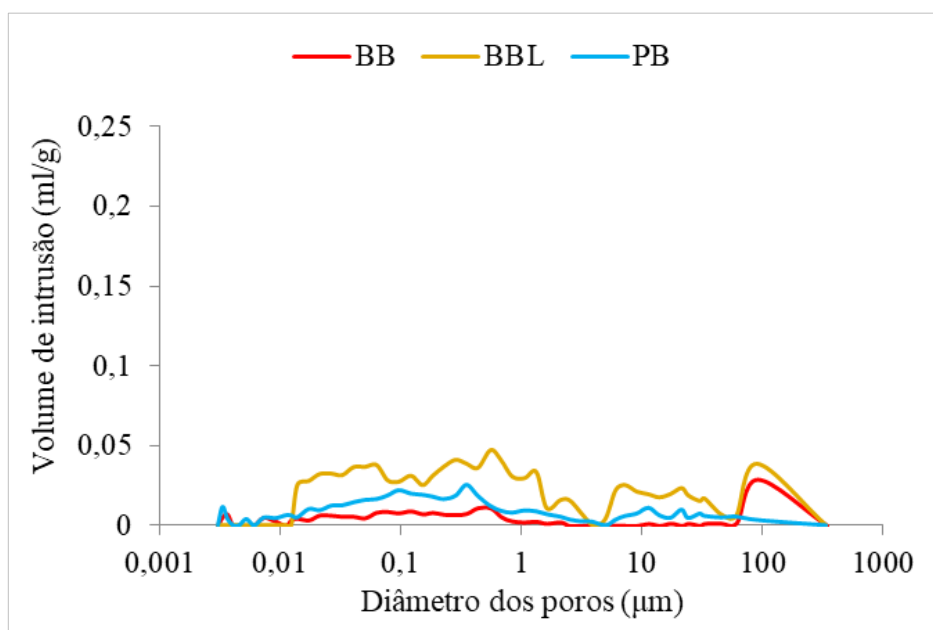


Figura 5.6 Substratos - distribuição dos poros (PB, BB e BBL)

Em geral é possível relacionar o coeficiente de absorção de água com a quantidade de poros na faixa $0,05 < \varnothing < 10 \mu\text{m}$. Os substratos com menor coeficiente de absorção de água (TF e PB) possuem uma quantidade de poros menor nessa faixa.

Em relação a permeabilidade ao vapor de água verifica-se que os substratos cerâmicos (TF e TM) possuem um maior diâmetro médio de poros (tabela 5.2) do que o substrato placa de betão (PB) e este fato aliado à maior porosidade aberta conduziu a menor resistência ao vapor de água, mesmo com a placa de betão a obter um maior percentual de poros na faixa que tem maior influência ($0,01 \mu\text{m} - 0,05 \mu\text{m}$ e $> 10 \mu\text{m}$) neste parâmetro.

Tabela 5.2 Substratos - Diâmetro médio dos poros

Substratos	Diâmetro médio dos poros (μm)
BB	0,076
BBL	0,120
PB	0,058
TF	0,166
TM	0,480

Essa diferença entre a distribuição dos poros dos substratos cerâmicos e substratos de betão também foi observada por Kazmierczak *et. al*, 2007 que concluíram que o substrato cerâmico possui uma maior concentração de poros entre 0,1 μm e 3 μm e que os poros do bloco de betão possuem uma concentração maior na faixa de 30 μm e 200 μm .

Para complementar a análise dos resultados foi realizada a matriz de correlação dos resultados dos substratos. Como a série de dados do tijolo maciço para massa volúmica não segue a distribuição normal, valor de $p < 0,05$, (tabela 5.3) procedeu-se com a matriz de correlação de Spearman para as correlações que envolviam o tijolo maciço (tabela 5.4 e 5.5). Para as restantes, foi utilizada a matriz de correlação de Pearson, pela normalidade dos dados (tabela 5.6 e 5.7). Assim, foram elaboradas diversas matrizes de correlação envolvendo:

- todos os substratos (tabela 5.4);
- apenas os substratos cerâmicos (tabela 5.5);
- apenas os substratos de betão (tabela 5.6);
- apenas os substratos bloco de betão e placa de betão (tabela 5.7).

Tabela 5.3 Substratos teste de normalidade (Shapiro-Wilk)

Substratos	MV	PA	PV	CA
TF	0,055	0,129	0,674	0,617
BB	0,956	0,312	0,388	0,480
BBL	0,672	0,196	0,149	0,074
PB	0,088	0,654	0,228	0,237
TM	0,004	0,554	0,093	0,805

Na matriz de correlação com os dados de todos os substratos (tabela 5.4) é possível notar a correlação negativa entre a massa volúmica e as demais propriedades. Além de uma boa correlação ($R = -0,734$) entre a massa volúmica e a porosidade aberta.

Tabela 5.4 Matriz de correlação (todos os substratos)

	MV	PA	PV	CA
MV	-			
PA	-0,734	-		
PV	-0,519	0,205	-	
CA	-0,466	0,313	0,846	-

Onde: MV (massa volúmica); PA (porosidade aberta); PV (permeabilidade ao vapor de água); CA (coeficiente de absorção de água por capilaridade).

Quando se correlaciona os dados apenas dos substratos cerâmicos (tabela 5.5), ocorre uma melhoria da correlação entre a maioria das propriedades e o sentido das correlações permanece inalterado, quando comparado com a tabela 5.4.

Tabela 5.5 Matriz de correlação (substratos cerâmicos)

	MV	PA	PV	CA
MV	-			
PA	-0,807	-		
PV	-0,285	0,709	-	
CA	-0,238	0,706	0,855	-

Onde: MV (massa volúmica); PA (porosidade aberta); PV (permeabilidade ao vapor de água); CA (coeficiente de absorção de água por capilaridade).

Considerando apenas os substratos de betão (tabela 5.6) também se verifica uma melhoria da correlação entre as propriedades, da mesma forma que se verificou com a correlação apenas com os dados dos substratos cerâmicos, comparando com a matriz de correlação com todos os valores (tabela 5.4).

Tabela 5.6 Matriz de correlação (substratos de betão)

	MV	PA	PV	CA
MV	-			
PA	-0,851	-		
PV	-0,656	0,713	-	
CA	-0,577	0,822	0,875	-

Onde: MV (massa volúmica); PA (porosidade aberta); PV (permeabilidade ao vapor de água); CA (coeficiente de absorção de água por capilaridade).

Na tabela 5.7 foram considerados apenas os substratos de bloco de betão e placa de betão e pôde-se observar uma correlação forte entre todas as propriedades ($R > 0,90$; $R^2 = 0,81$), o que indica que o bloco de betão leve não é semelhante aos demais substratos de betão, o que já era esperado pela análise visual e pela análise dos resultados apresentada anteriormente.

Tabela 5.7 Matriz de correlação (apenas BB e PB)

	MV	PA	PV	CA
MV	-			
PA	-0,976	-		
PV	-0,963	0,900	-	
CA	-0,971	0,919	0,990	-

Onde: MV (massa volúmica); PA (porosidade aberta); PV (permeabilidade ao vapor de água); CA (coeficiente de absorção de água por capilaridade).

Com os resultados das matrizes de correlação dos dados, aliada à ordem de grandeza da massa volúmica e porosidade aberta entre os grupos, a similaridade na distribuição dos poros, o comportamento face a absorção de água e análise visual da superfície apresentada no capítulo 4, além da diferença de composição dos constituintes dos substratos, é então possível concluir que os substratos possuem diferenças entre eles e podem ser divididos em 3 grupos distintos: **substratos cerâmicos, substratos de betão e substrato com agregados leves.**

5.2. Argamassa endurecida no molde e argamassas aplicadas e destacadas dos substratos aos 28 dias

A simbologia utilizada nesta secção permanece a mesma dos capítulos anteriores:

- **Argamassa endurecida nos moldes normalizados:** **MP:** argamassa moldada no molde prismático 16 x 4 x 4 cm³; **MC:** argamassa moldada no molde prismático com dimensões compatibilizadas 1,5 x 4 x 4 cm³.
- **Argamassa endurecida e destacadas dos substratos (aos 28 dias de cura):** **APB:** argamassa aplicada na placa de betão; **ABB:** argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL:** argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF:** argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM:** argamassa aplicada no tijolo maciço.

Na figura 5.7 faz-se a comparação dos resultados obtidos para a massa volúmica e porosidade aberta da argamassa endurecida no molde e argamassa aplicada e destacada dos diversos substratos. Todos os resultados obtidos (apresentados no capítulo 4) possuem um coeficiente de variação menor do que 30%. Portanto, a média possui grande significado (Falco, 2016). Os valores médios obtidos para a massa volúmica encontram-se de acordo com o esperado para argamassas de uso geral (entre 1400 e 1850 kg/m³) (Flores-Colen, 2009).

A argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ATF), comparada com a endurecida no molde (MC), obteve uma massa volúmica mais elevada cerca de 15%, uma porosidade aberta inferior em cerca de 22%, e a argamassa aplicada ao tijolo cerâmico maciço (ATM) teve a massa volúmica mais elevada cerca de 15% e uma porosidade aberta mais reduzida cerca de 20%.

Comparando a argamassa aplicada na placa de betão (APB) com a endurecida no molde (MC), observa-se que a massa volúmica aumentou cerca de 12%, a porosidade aberta reduziu cerca de 9% e comparando a argamassa aplicada no bloco de betão (ABB) com a argamassa endurecida no molde (MC), vê-se que a massa volúmica aumentou cerca de 13%, a porosidade aberta diminuiu cerca de 10%.

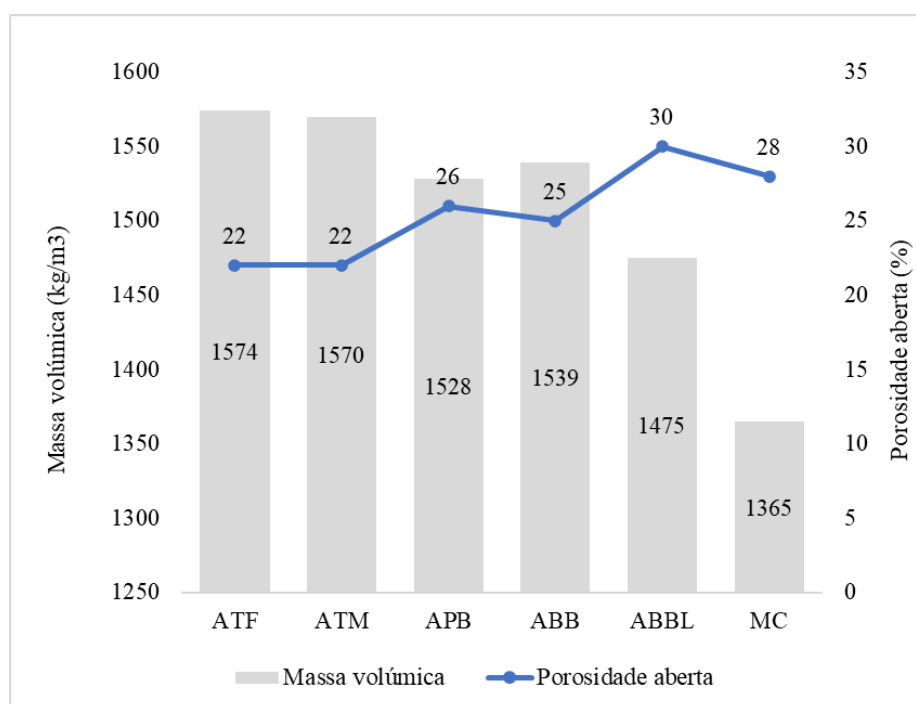


Figura 5.7 Comparação massa volúmica (argamassas 28 dias de cura)

Finalmente, comparando a argamassa aplicada ao bloco de betão leve (ABBL) com a argamassa endurecida no molde (MC), conclui-se que a massa volúmica aumentou aproximadamente 8% e a porosidade aberta aumentou cerca de 7%.

Em relação aos resultados obtidos, salienta-se que a massa volúmica e a porosidade aberta refletem a relação entre a compacidade da argamassa e o volume de vazios (Nakakura & Cincotto, 2004) e variam de forma inversamente proporcional (Sequeira et al., 2012).

Soares (2021) também constatou a redução da porosidade aberta para argamassas de cal hidráulica aplicadas ao tijolo cerâmico maciço e a pedra natural (cerca de 20%) e para argamassas de cal aérea aplicadas aos mesmos substratos (cerca de 13%). Torres et al. (2018) observou a redução da porosidade aberta da argamassa industrial aplicada no substrato de tijolo cerâmico furado em 30% quando comparada com a mesma argamassa endurecida no molde normalizado.

As argamassas endurecidas sobre substratos cerâmicos atingiram menores valores de porosidade aberta quando comparadas com as argamassas endurecidas sobre blocos de betão, este fato também foi observado por Gouveia (2021) e Torres (2014).

Este facto está relacionado com o menor diâmetro médio dos poros dos substratos de betão (entre 0,058 e 0,12 μm) relativamente ao tamanho médio dos poros dos substratos cerâmicos (entre 0,166 e 0,480 μm), que possuem o diâmetro médio de poros mais compatíveis com o diâmetro médio dos poros da argamassa aplicada (entre 0,184 e 0,340 μm), como observado por Carasek (1996), aliado ao fato de que os substratos cerâmicos têm mais poros na faixa de absorção capilar ($0,05 < \varnothing < 10 \mu\text{m}$).

A diferença entre a porosidade aberta das argamassas endurecidas sobre substratos cerâmicos (ATF), a porosidade aberta das argamassas endurecidas sobre substratos de betão (ABB) e a porosidade aberta da argamassa endurecida no molde padrão (MC) também pode ser observada nas imagens binarizadas centrais de uma seção média obtidas pela μCT (Figura 5.8) onde as manchas escuras representam os poros.

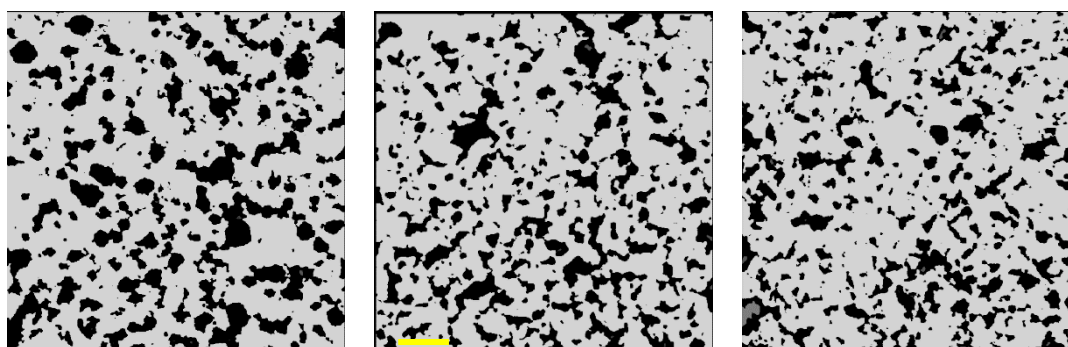


Figura 5.8 MC (esq.); ABB (centro); ATF (dir.). (Barra amarela: 1 cm)

Em relação à interface argamassa/substrato, a formação de uma camada mais fina e o aumento da porosidade ao se afastar do substrato pôde ser observado pela microtomografia de raios-X (μ CT). A redução dessa porosidade ocorre devido à ação das forças capilares dos substratos, fato também observado por Costa e John (2011). Os substratos cerâmicos parecem ter maior compactação na zona de contato do que os substratos de betão, confirmando esta hipótese.

Nas argamassas aplicadas, nota-se maior compactação/menor porosidade nas proximidades da interface argamassa/substrato, apresentando poros uma forma mais irregular do que a argamassa endurecida no molde normalizado.

É possível notar que a cerca de 2 mm da interface, a argamassa apresenta-se mais compactada para todos os casos. Esta zona de influência da interface (1-2 mm do substrato) também foi observada por Sadowski e Stefaniuk (2017).

A diferença entre a forma dos poros de MC e da argamassa endurecida nos substratos pode não ser apenas devido à influência do substrato. Ainda, pode estar relacionado à forma de aplicação e à capacidade de facilitar a saída do ar da argamassa endurecida nos substratos devido à menor espessura em relação à espessura do molde metálico. Este trabalho não estudou a contribuição dessas tendências na forma dos poros.

Nesta comparação de resultados pode ver-se que a argamassa endurecida no molde, sem qualquer contato com o substrato, apresenta resultados diferentes em relação à argamassa aplicada nos substratos.

Em relação à influência do substrato conclui-se, tal como Torres (2014), que quando aumenta a porosidade do substrato (PB, BB, TF, BBL, TM) a sua influência na massa volúmica e na porosidade aberta da argamassa aumentam.

Por conseguinte, a porosidade do substrato e a distribuição dos seus poros afeta as características da argamassa aplicada. Percebe-se que para os substratos cerâmicos com maior quantidade percentual de poros na faixa de absorção capilar (maior efeito de sucção capilar) e maior porosidade aberta, resultaram argamassas aplicadas mais compactas, com maior massa volúmica e menor porosidade aberta.

Nas figuras 5.9 e 5.10 apresenta-se a distribuição dos poros da argamassa endurecida no molde e das argamassas aplicadas e destacadas dos substratos. A figura 5.9 apresenta a comparação da argamassa aplicada nos substratos cerâmicos (ATF e ATM) com a argamassa endurecida no molde normalizado (MC).

Salienta-se a redução da porosidade aberta, pelo volume intrusão de mercúrio, das argamassas após aplicação, em relação à argamassa endurecida no molde. Porém, o aspeto da curva de distribuição dos poros é semelhante (figura 5.9). Com a diferença de ATM possuir mais poros na faixa de 0,05 μm – 10 μm do que MC.

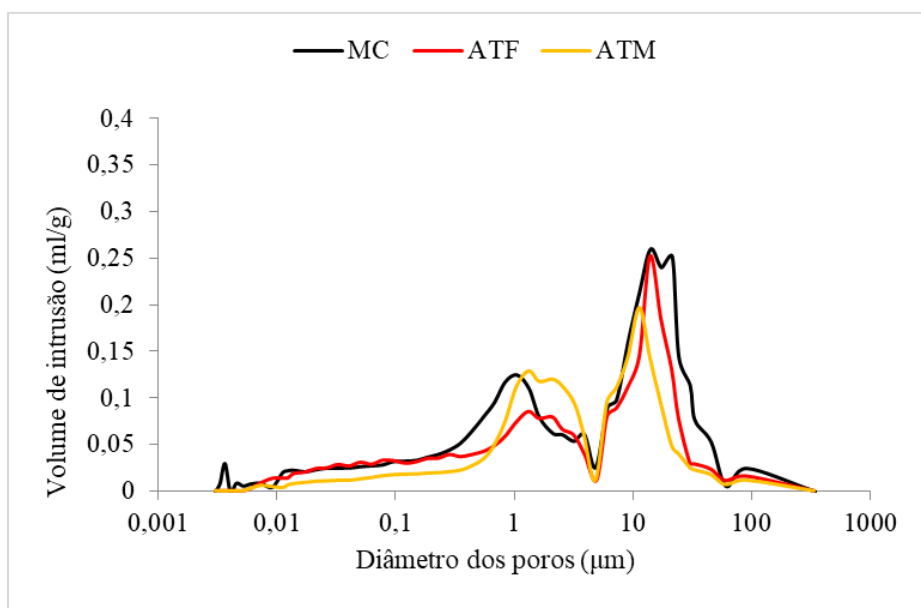


Figura 5.9 Porosimetria por intrusão de mercúrio (MC; ATF; ATM)

Em relação à comparação das argamassas endurecidas nos substratos de betão com a argamassa endurecida no molde (figura 5.10). O aspeto da curva de distribuição também é semelhante. Porém, nota-se que MC possui uma porosidade aberta maior do que ABBL, ao contrário do resultado obtido no ensaio de porosidade aberta (figura 5.7). Tal fato deve ser investigado em trabalhos futuros.

De forma geral, verifica-se que existe uma diferença na distribuição dos poros entre os conjuntos. Considerando as limitações da metodologia, a análise realizada refere-se principalmente ao domínio limitado a cerca de 100 μm (os poros com dimensões superiores a 100 micrómetros estão fora do intervalo).

Desta forma, há uma redução da porosidade aberta quando se compara MC com as argamassas endurecidas nos substratos e uma pequena diminuição da percentagem de poros na faixa de 0,01 a 0,05 μm . Entretanto, os substratos parecem aumentar o diâmetro médio dos poros da argamassa, que varia de 14% (ABBL) a 111% (ATM). A utilização de apenas um provete por argamassa e seu tamanho reduzido na realização do ensaio de porosimetria é um fator condicionante na análise.

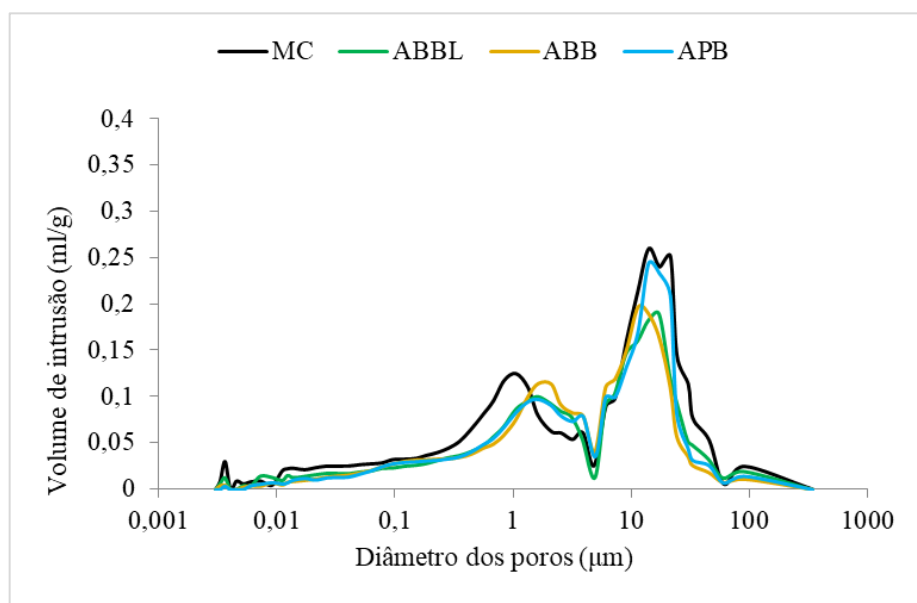


Figura 5.10 Porosimetria por intrusão de mercúrio (MC; ABB; APB; ABBL)

Em relação ao comportamento face à água, as figuras 5.11 a 5.12 mostram a comparação dos resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e índice de secagem obtidos para a argamassa endurecida no molde com os resultados obtidos para a argamassa aplicada e destacada dos substratos.

Individualmente, aos 28 dias, ao comparar os resultados da argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ATF) com os resultados da argamassa endurecida no molde (MC),

vê-se que o coeficiente de absorção capilar reduziu 16%, e para a argamassa aplicada no tijolo cerâmico maciço (ATM), o coeficiente de absorção capilar aumentou em 21%.

Quanto à argamassa aplicada na placa de betão (APB), verificou-se que o coeficiente de absorção capilar reduziu 26% em relação ao mesmo coeficiente para a argamassa endurecida no molde, já para argamassa aplicada no bloco de betão (ABB), o mesmo parâmetro reduziu 20% e para argamassa aplicada no bloco de betão leve (ABBL), o coeficiente de absorção capilar aumentou 40%.

Portanto, a argamassa aplicada nos substratos de betão obteve um coeficiente de absorção por capilaridade menor do que a argamassa endurecida no molde.

Quanto à influência do substrato pode-se observar que, em geral, a absorção de água por capilaridade foi mais lenta para as argamassas aplicadas e destacadas. É esperado que isso ocorra devido a redução da porosidade aberta (Torres, 2014; Soares, 2021).

Porém, para ABBL e ATM o valor obtido foi superior ao obtido para MC. No caso de ATM, percebe-se uma maior quantidade de poros na faixa de influência capilar ($ATM = 1.268 \text{ ml/g}$ e $MC = 1,220 \text{ ml/g}$) o que pode ter influenciado este aumento da absorção por capilaridade. Para ABBL, que possui uma porosidade aberta superior a MC o que justifica a maior absorção por capilaridade.

Para a permeabilidade ao vapor de água e o índice de secagem (figura 5.12), individualmente, aos 28 dias, ao comparar a argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ATF) com a argamassa endurecida no molde (MC), o índice de secagem reduziu 3% e a o coeficiente de permeabilidade ao vapor aumentou cerca de 14%. Na argamassa aplicada no tijolo cerâmico

maciço (ATM), em relação à endurecida no molde (MC), o índice de secagem reduziu em 14% e o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água aumentou em cerca de 11%.

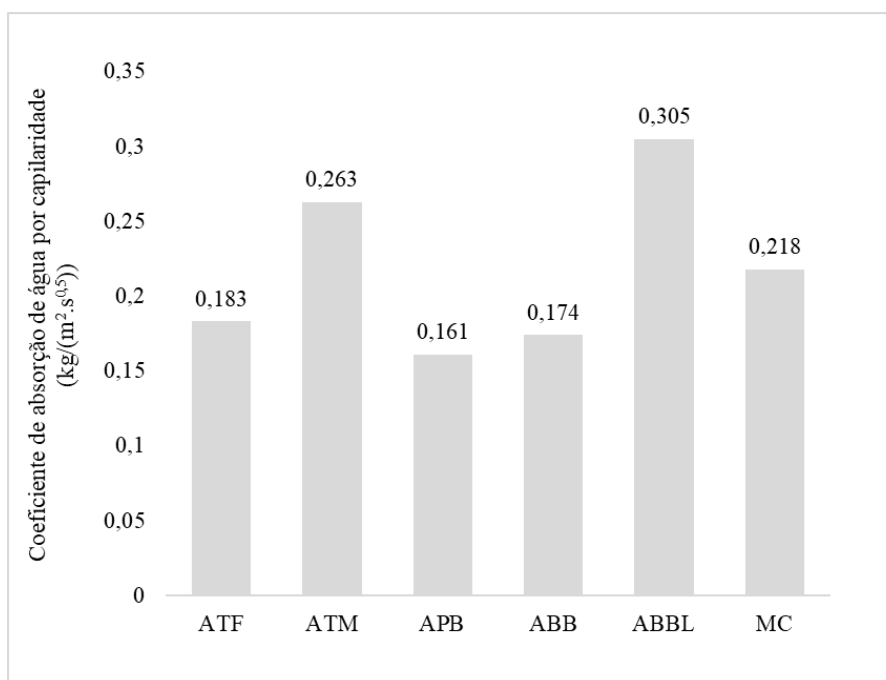


Figura 5.11 Comparação coeficiente de absorção por capilaridade (argamassas 28 dias de cura)

Já para a argamassa aplicada na placa de betão (APB), o índice de secagem foi diminuiu 6% e o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água aumentou 21%. Na argamassa aplicada no bloco de betão (ABB), o índice de secagem aumentou em 8% e a permeabilidade ao vapor de água aumentou em 24%, quando comparada a argamassa endurecida no molde (MC).

A argamassa aplicada no bloco de betão leve (ABBL), quando comparada com a argamassa endurecida no molde (MC), o índice de secagem reduziu 18%, o coeficiente de permeabilidade ao vapor d'água aumentou cerca de 28%.

Os valores obtidos mostram que a permeabilidade ao vapor de água aumentou para todas as argamassas endurecidas nos substratos em comparação com a argamassa endurecida no molde.

Embora Fernandes et al. (2005b) relacionam o aumento da porosidade aberta com o aumento da permeabilidade ao vapor, Coutinho e Gonçalves (1994) indicam que o diâmetro dos poros influencia nessa questão. A argamassa endurecida nos substratos possui um diâmetro médio de

poros maior que a argamassa endurecida no molde (tabela 5.8) e conseqüentemente uma maior permeabilidade ao vapor de água.

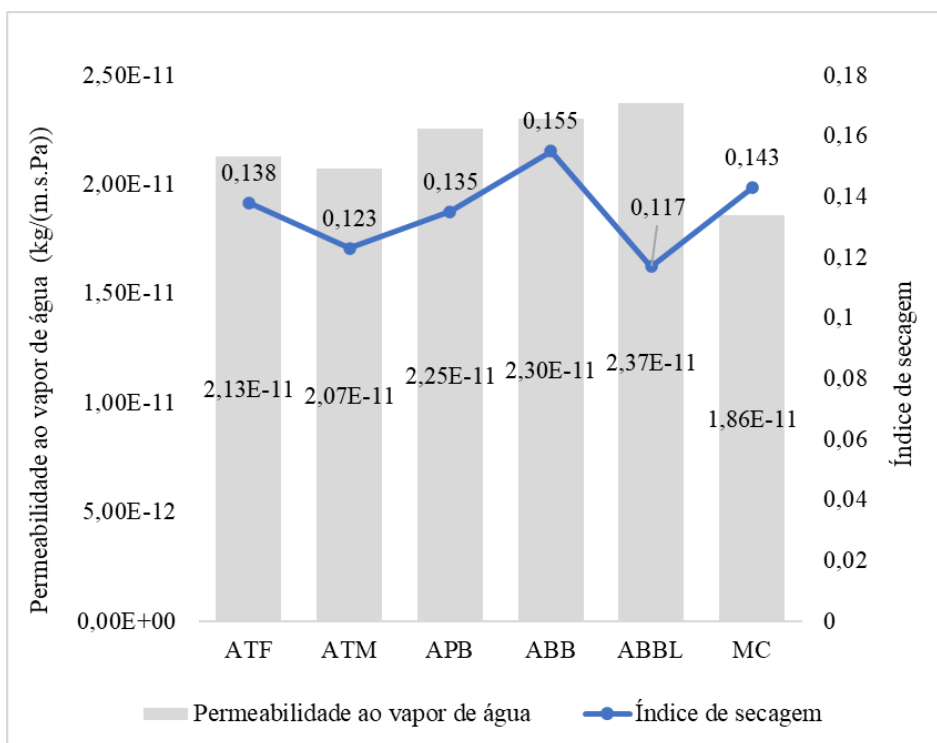


Figura 5.12 Comparação Índice de secagem (argamassas 28 dias de cura)

Em relação ao índice de secagem, a argamassa aplicada e destacada dos substratos, em geral, obteve uma secagem mais rápida do que a argamassa endurecida no molde metálico. Tal fato está de acordo com o observado na permeabilidade ao vapor de água, essa relação também foi observada por Flores-Colen (2009), Torres (2014) e Brown et al. (2004).

Tabela 5.8 Diâmetro médio dos poros da argamassa

Argamassa	Diâmetro médio dos poros (μm)
MC	0,161
ABB	0,268
ABBL	0,184
APB	0,304
ATF	0,191
ATM	0,340

Na figura 5.13 é apresentada a comparação dos resultados obtidos para a resistência à compressão e para o módulo de elasticidade dinâmico da argamassa endurecida no molde e das argamassas destacadas dos substratos.

Pode notar-se que a resistência à compressão da argamassa destacada dos substratos é maior do que a resistência à compressão da argamassa endurecida no molde. Tal fato está de acordo com o aumento da compacidade da argamassa e a redução da porosidade aberta.

Individualmente, aos 28 dias, a argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ATF), quando comparada com a argamassa endurecida no molde (MC), apresenta uma resistência à compressão cerca de 94% superior, e um módulo de elasticidade dinâmico cerca de 37% superior. A resistência à compressão da argamassa aplicada no tijolo cerâmico maciço (ATM) aumentou cerca de 145%, e o módulo de elasticidade dinâmico aumentou cerca de 56%, em comparação com a argamassa endurecida no molde (MC).

A resistência à compressão da argamassa aplicada na placa de betão (APB) aumentou cerca de 54%, e o módulo de elasticidade diminuiu 8%, em relação aos mesmos parâmetros da argamassa endurecida no molde. Na argamassa aplicada ao bloco de betão (ABB), a resistência à compressão aumentou cerca de 55%, e o módulo de elasticidade aumentou cerca de 24%.

Para a argamassa aplicada no bloco de betão leve (ABBLL), a resistência à compressão aumentou cerca de 56%. O módulo de elasticidade dinâmico aumentou cerca de 7%, quando comparada com a argamassa endurecida no molde (MC).

O aumento da resistência à compressão das argamassas destacadas em relação a argamassa endurecida no molde metálico também foi observado por Torres (2014) e Gouveia (2021). Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, os resultados encontrados estão de acordo com Torres (2014), cerca de 4 GPa, e Flores-Colen (2009), na ordem de 5GPa.

Apesar de não haver muita diferença, pode-se perceber que ocorreu um aumento no módulo de elasticidade dinâmico da argamassa aplicada nos substratos em relação ao módulo de elasticidade dinâmico da argamassa endurecida no molde.

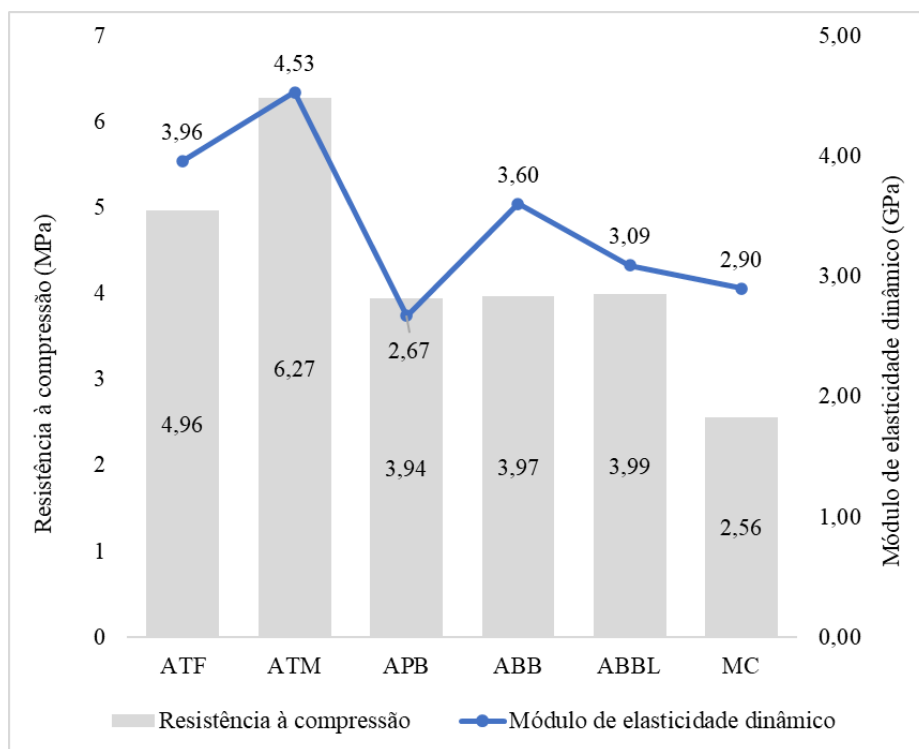


Figura 5.13 Comparação resistência à compressão (argamassas 28 dias de cura)

Quanto à resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico, sabe-se que ambos estão relacionados com a porosidade aberta. As argamassas aplicadas nos substratos, que apresentam porosidade aberta menor que a argamassa endurecida no molde, obtiveram valores superiores em ambas as características (Magalhães et al., 2003).

Porém, a argamassa APB obteve valores fora do esperado para o módulo de elasticidade dinâmico (redução de 8%), tal fato pode estar relacionado com a presença de microfissuras, uma vez que fissuras e vazios conduzem a alterações na propagação das ondas ultrassônicas (Magalhães et al., 2003; Martins, 2008).

Para compreender a influência do substrato nas características da argamassa após aplicação nos substratos, em comparação com a argamassa endurecida no molde normalizado, foi realizada a análise estatística ANOVA.

Com esta análise estatística, é possível verificar se existe diferença estatisticamente significativa entre a argamassa endurecida no molde normalizado (MC) e as argamassas

endurecidas nos substratos. Para identificar as diferenças entre os grupos de forma pareada, foi utilizado o *Post-Hoc* de Games-Howell, conforme indicado na metodologia.

Com o objetivo de atender aos pressupostos da ANOVA, apenas para a argamassa MC foi realizado o teste de normalidade, de Shapiro-Wilk (tabela 5.9), tendo em vista que as argamassas endurecidas nos substratos possuem mais de 30 elementos é dispensável o teste de normalidade, devido o Teorema Central do Limite. Para a verificação da homoscedasticidade, foi executado o teste de Levene (tabela 5.10).

Tabela 5.9 Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)

Teste de Shapiro-Wilk (MC)	W	Valor-p
Massa volúmica (kg/m ³)	0,960	0,463
Porosidade aberta (%)	0,955	0,371
Coefficiente de absorção de água por capilaridade	0,965	0,601
Índice de secagem	0,926	0,981
Resistência à compressão (MPa)	0,115	0,915

Tabela 5.10 Teste Levene

Teste de Levene	F	gl1	gl2	Valor-p
Massa volúmica (kg/m ³)	7,22	5	221	<,001
Porosidade aberta (%)	8,96	5	220	<,001
Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/(m ² .s ^{0.5}))	9,59	5	224	<,001
Índice de secagem	4,15	5	222	0,001
Resistência à compressão (MPa)	7,51	5	221	<,001

Foi verificada a normalidade dos dados, porém as variâncias não são homogêneas ($p < 0,05$), portanto prosseguiu-se com a ANOVA com a correção de Welch (tabela 5.11).

Tabela 5.11 ANOVA com a correção de Welch

	<i>F</i>	<i>gl1</i>	<i>gl2</i>	Valor- <i>p</i>
Massa volúmica (kg/m ³)	1999,1	5	102,4	<,001
Porosidade aberta (%)	879,4	5	97,5	<,001
Coefficiente de absorção de água por capilaridade (kg/(m ² .s ^{0.5}))	263,5	5	94,8	<,001
Índice de secagem	69,8	5	96,1	<,001
Resistência à compressão (MPa)	432,7	5	101,8	<,001

A ANOVA indica que existe diferença estatisticamente significativa entre os conjuntos de amostras para todos os ensaios analisados e o *Post-Hoc* de Games-Howell, tabela 5.12, confirma que existe diferença estatisticamente significativa entre os valores da argamassa endurecida nos moldes e a argamassa endurecida nos substratos, com exceção para o índice de secagem (ATF), Valor-*p* > 0,05.

Tabela 5.12 *Post-Hoc* Games-Howell

Post-Hoc Games-Howell			ABB	ABB _L	APB	ATF	ATM
MV	MC	Valor- <i>p</i>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
PA	MC	Valor- <i>p</i>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Aw	MC	Valor- <i>p</i>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
IS	MC	Valor- <i>p</i>	<0,001	<0,001	0,028	0,448	<0,001
RC	MC	Valor- <i>p</i>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Onde: MV – massa volúmica; PA – porosidade aberta; Aw – coeficiente de absorção de água por capilaridade; IS – índice de secagem; RC – resistência à compressão; Em negrito Valor-*p* > 0,05.

É então possível concluir que existe diferença estatisticamente significativa entre os valores da argamassa endurecida no molde normalizado e as argamassas endurecidas nos substratos, confirmando assim as diferenças encontradas.

Porém, cabe ainda compreender se as diferenças entre as argamassas endurecidas nos substratos são estatisticamente significativas. As tabelas 5.13 a 5.15, indicam o resultado do teste de Games-Howell, por ensaio, para as argamassas endurecidas nos substratos.

O teste de Games-Howell mostra que para a massa volúmica (tabela 5.13) não existe diferença estatisticamente significativa para os grupos APB/ABB e ATF/ATM, pois o Valor- p (0,110 e 0,762) é maior do que 0,05.

Tabela 5.13 Massa volúmica (Games-Howell)

		ABB	ABBL	APB	ATF	ATM
ABB	Valor- p	—	<,001	0,110	<,001	<,001
ABBL	Valor- p		—	<,001	<,001	<,001
APB	Valor- p			—	<,001	<,001
ATF	Valor- p				—	0,762

Nota: Em negrito Valor- $p > 0,05$

Para a porosidade aberta (tabela 5.14), como na massa volúmica, não existe diferença estatisticamente significativa para os grupos APB/ABB e ATF/ATM, pois o Valor- p (0,325 e 0,316) é maior do que 0,05.

Tabela 5.14 Porosidade aberta (Games-Howell)

		ABB	ABBL	APB	ATF	ATM
ABB	Valor- p	—	<,001	0,325	<,001	<,001
ABBL	Valor- p		—	<,001	<,001	<,001
APB	Valor- p			—	<,001	<,001
ATF	Valor- p				—	0,316

Nota: Em negrito Valor- $p > 0,05$.

No caso do coeficiente de absorção por capilaridade (tabela 5.15), não existe diferença estatisticamente significativa para os grupos APB/ABB e ATF/ABB, pois o Valor- p (0,157 e 0,516) é maior do que 0,05.

Tabela 5.15 Coeficiente de absorção por capilaridade (Games-Howell)

		ABB	ABBL	APB	ATF	ATM
ABB	Valor- p	—	<,001	0,208	0,615	<,001
ABBL	Valor- p		—	<,001	<,001	<,001
APB	Valor- p			—	<,001	<,001
ATF	Valor- p				—	<,001

Nota: Em negrito Valor- p > 0,05.

Para o índice de secagem (tabela 5.16), não existe diferença estatisticamente significativa para ATF/APB, pois o Valor- p (0,798) é maior do que 0,05.

Tabela 5.16 Índice de secagem (Games-Howell)

		ABB	ABBL	APB	ATF	ATM
ABB	Valor- p	—	<,001	<,001	<,001	<,001
ABBL	Valor- p		—	<,001	<,001	0,018
APB	Valor- p			—	0,798	<,001
ATF	Valor- p				—	<,001

Nota: Em negrito Valor- p > 0,05.

Para a resistência à compressão (tabela 5.17), nota-se que não existe diferença estatisticamente significativa entre os substratos de betão ABB/ABBL, ABB/APB e APB/ABBL, pois o Valor- p (1,00, 1,00 e 0,997) é maior do que 0,05.

Tabela 5.17 Resistência à compressão (Games-Howell)

		ABB	ABBL	APB	ATF	ATM
ABB	Valor- <i>p</i>	—	1,000	1,000	<,001	<,001
ABBL	Valor- <i>p</i>		—	0,997	<,001	<,001
APB	Valor- <i>p</i>			—	<,001	<,001
ATF	Valor- <i>p</i>				—	<,001

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Portanto, na análise estatística dos dados, nota-se a tendência de 4 grupos distintos de argamassas. Observando os resultados dos grupos que não possuíram uma diferença estatisticamente significativa, pode-se fazer a seguinte divisão: argamassa aplicada em substratos cerâmicos, argamassa aplicada em substratos de betão, argamassa aplicada em substrato de betão leve e argamassa endurecida no molde normalizado.

Com esta análise confirma-se que a argamassa endurecida em moldes normalizados (MC) tem uma diferença estatisticamente significativa em relação às argamassas endurecidas nos substratos e que substratos diferentes exercem uma influência diferente na argamassa que pode ser dividida em 3 grupos distintos: blocos cerâmicos, substratos de betão e blocos de betão com agregados leves.

Para auxiliar a visualização da formação dos grupos, foi traçado o gráfico massa volúmica/porosidade aberta com todos os dados (figura 5.14). Com esse gráfico é possível observar o agrupamento dos resultados de MC, ATM/ATF, APB/ABB e ABBL.

Então, pode-se considerar a divisão da influência dos substratos em substratos cerâmicos (TF e TM), betão (BB, PB) e betão com agregados leves (BBL). Para compreender a relação das características dos substratos com as características da argamassa aplicada, foi realizada a matriz de correlação de Pearson entre os dados das argamassas e dos substratos (tabelas 5.18 e 5.19), com o objetivo de avaliar quais as propriedades dos substratos que têm relação significativa com quais características da argamassa.

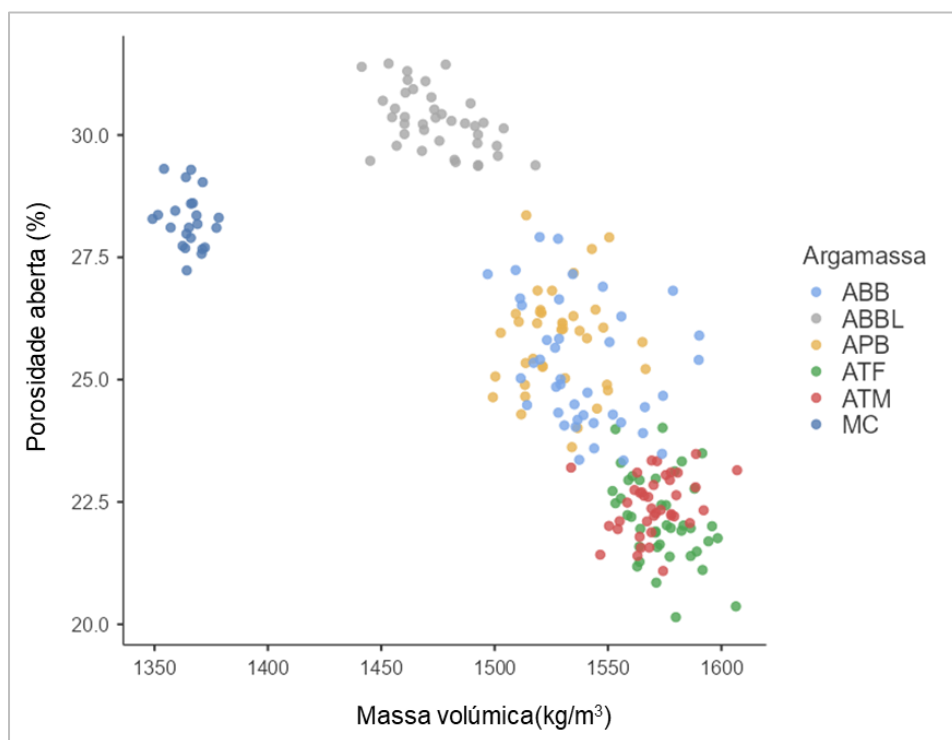


Figura 5.14 Massa volúmica x porosidade aberta (argamassas 28 dias de cura)

Pode-se observar pela matriz de correlação que, no caso de substratos cerâmicos (tabela 5.18), há uma boa relação entre o coeficiente de absorção de água do substrato e a porosidade aberta da argamassa ($R = -0,641$), indicando que quanto maior a absorção do substrato, menor será a porosidade da argamassa aplicada.

Tabela 5.18 Correlação de Pearson entre as propriedades dos substratos e características das argamassas para substratos cerâmicos

Argamassa / substrato	MV (kg/m^3)	PA (%)	PV ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$)	Aw (($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{S}^{0,5})$))
MV (kg/m^3)	-0,192	0,119	0,070	0,421
PA (%)	0,019	-0,237	-0,480	-0,641*
Aw (($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{S}^{0,5})$))	-0,523*	0,357	0,286	0,405
IS	-0,088	-0,173	0,394	-0,057
RC (MPa)	0,023	0,391	0,680*	0,618*
PV ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$)	-0,151	-0,142	-0,574	-0,520

Nota. * $p < .05$; MV – massa volúmica; PA – porosidade aberta; Aw – coeficiente de absorção de água por capilaridade; IS – índice de secagem; RC – resistência à compressão; PV – permeabilidade ao vapor de água.

Para substratos de betão (tabela 5.19), a porosidade aberta do substrato tem uma boa relação com a porosidade aberta da argamassa aplicada ($R = -0,685$). Assim, a menor porosidade aberta do substrato correlaciona-se com uma maior porosidade aberta da argamassa. A tabela 5.19 também mostra que as propriedades dos substratos de betão têm uma correlação significativa com o a permeabilidade ao vapor de água das argamassas.

Tabela 5.19 Correlação de Pearson entre as propriedades dos substratos e características das argamassas para substratos de betão

Argamassa / Substrato	MV (kg/m ³)	PA (%)	PV (kg/(m.s.Pa))	Aw (kg/(m ² .S ^{0,5}))
MV (kg/m ³)	-0,037	-0,077	0,154	0,006
PA (%)	0,648*	-0,685*	-0,549	-0,506
Aw ((kg/(m ² .S ^{0,5}))	0,195	-0,269	0,108	-0,093
IS	-0,283	0,241	0,358	0,494
RC (MPa)	0,030	-0,044	0,074	0,144
PV (kg/(m.s.Pa))	0,788*	-0,752*	-0,830**	-0,850**

Nota. * $p < .05$, ** $p < .01$; MV – massa volúmica; PA – porosidade aberta; Aw – coeficiente de absorção de água por capilaridade; IS – índice de secagem; RC – resistência à compressão; PV – permeabilidade ao vapor de água.

Quanto à correlação dos resultados entre BBL e ABBL, não foram encontradas correlações significativas entre as características dos substratos e a argamassa aplicada.

Portanto, existe uma correlação entre a absorção de água dos substratos cerâmicos e a porosidade aberta da argamassa aplicada e a porosidade aberta dos substratos de betão com a permeabilidade ao vapor de água da argamassa aplicada, fato que fica claro quando se percebe que as argamassas aplicadas sobre substratos de betão tornaram-se mais permeáveis ao vapor de água do que as argamassas aplicadas sobre substratos cerâmicos e as argamassas aplicadas sobre substratos cerâmicos tornam-se mais compactas (menor porosidade aberta) do que as argamassas aplicadas sobre substratos de betão.

Esta situação pode estar relacionada com o fato de os substratos cerâmicos possuírem um poder de absorção de água maior e mais prolongado do que os substratos de betão e com isso, sua influência é mais notada na compactação da argamassa aplicada, com a redução da sua porosidade aberta. A redução da porosidade aberta e a distribuição dos poros acaba por controlar todo o comportamento da argamassa.

As diferenças encontradas não esgotam o tema. Fatores como a aplicação da argamassa e a capacidade de facilitar a saída do ar da argamassa endurecida nos substratos devido à menor espessura em relação à espessura do molde normalizado, podem contribuir na forma dos poros e não foram estudadas neste trabalho.

Assim, a possibilidade de transferência de água da argamassa para o substrato cria um déficit local no teor de água. Este aspeto pode afetar a concentração e compacidade do ligante, principalmente na interface. Indiretamente, todo o sistema será afetado pela menor quantidade relativa de água (menos porosidade e mais compacidade, e todas as propriedades dependem mais desses parâmetros).

Alguns autores já tinham observado a influência diferenciada entre o substrato de betão e o substrato cerâmico, porém em aspetos ligados a aderência (Souza et al., 2015; Scartezini e Carasek, 2003).

Em resumo, os substratos influenciam as características da argamassa industrial de uso geral, conforme a tabela 5.20. Porém, o poder dessa influência depende do tipo de substrato.

Em geral, a massa volúmica aumenta, a porosidade aberta diminui, o coeficiente de absorção por capilaridade diminui, o índice de secagem diminui, a permeabilidade ao vapor de água aumenta, a resistência à compressão aumenta e o módulo de elasticidade dinâmico aumenta.

Tabela 5.20 Resumo da influência do substrato na argamassa aplicada

Argamassas aplicadas ao substrato	MV (kg/m ³)	PA (%)	Aw (kg/(m ² .S ^{0.5}))	IS	PV (kg/(m.s.Pa))	RC (MPa)	E (GPa)
TF	+ 15%	- 22%	- 16%	- 3%	+ 15%	+ 94%	+ 37%
TM	+ 15%	- 21%	+ 21%	- 14%	+ 12%	+ 145%	+ 56%
PB	+ 12%	- 9%	- 26%	- 6%	+ 21%	+ 54%	- 8%
BB	+ 13%	- 10%	- 20%	+ 8%	+ 24%	+ 55%	+ 24%
BBL	+8%	+ 7%	+ 40%	- 18%	+ 283%	+ 56%	+ 7%

Onde: MV – massa volúmica; PA – porosidade aberta; Aw – coeficiente de absorção de água por capilaridade; IS – índice de secagem; RC – resistência à compressão; PV – permeabilidade ao vapor de água; E – módulo de elasticidade.

5.3. Argamassas endurecidas nos substratos com cura normal (28 dias), envelhecimento acelerado e cura no exterior

Nesta seção analisa-se a evolução das características da argamassa ao longo do tempo, comparando a argamassa endurecida no molde, com as argamassas endurecidas e destacadas dos substratos com 28 dias de cura, sujeitas ao envelhecimento acelerado e com as argamassas endurecidas e destacadas dos substratos com 28 dias de cura, sujeitas a 300 dias de cura em ambiente exterior.

A simbologia utilizada permanece conforme os capítulos anteriores:

- **Argamassa endurecida nos moldes normalizados:** **MC:** argamassa moldada no molde prismático com dimensões compatibilizadas 1,5 x 4 x 4 cm³.
- **Argamassa endurecida e destacadas dos substratos (aos 28 dias de cura):** **APB:** argamassa aplicada na placa de betão; **ABB:** argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL:** argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF:** argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM:** argamassa aplicada no tijolo maciço.
- **Argamassa endurecida e destacadas dos substratos (após envelhecimento acelerado):** **APB EA:** argamassa aplicada na placa de betão; **ABB EA:** argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL EA:** argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF EA:** argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM EA:** argamassa aplicada no tijolo maciço.
- **Argamassa endurecida e destacadas dos substratos (após 300 dias de cura no exterior):** **APB CE:** argamassa aplicada na placa de betão; **ABB CE:** argamassa aplicada no bloco de betão; **ABBL CE:** argamassa aplicada no bloco de betão leve; **ATF CE:** argamassa aplicada no tijolo furado; **ATM CE:** argamassa aplicada no tijolo maciço.

As figuras 5.15 e 5.16 comparam a evolução ao longo do tempo, da massa volúmica e porosidade aberta das argamassas. No caso da massa volúmica (figura 5.15) pode-se observar que se manteve o aumento desta propriedade na argamassa endurecida nos substratos em relação à argamassa endurecida no molde.

Pode-se observar que as argamassas aplicadas nos substratos cerâmicos, tanto com envelhecimento acelerado quanto com cura exterior, tiveram valores de massa volúmica mais elevados do as argamassas aplicadas nos substratos de betão, mantendo a tendência das argamassas endurecidas aos 28 dias.

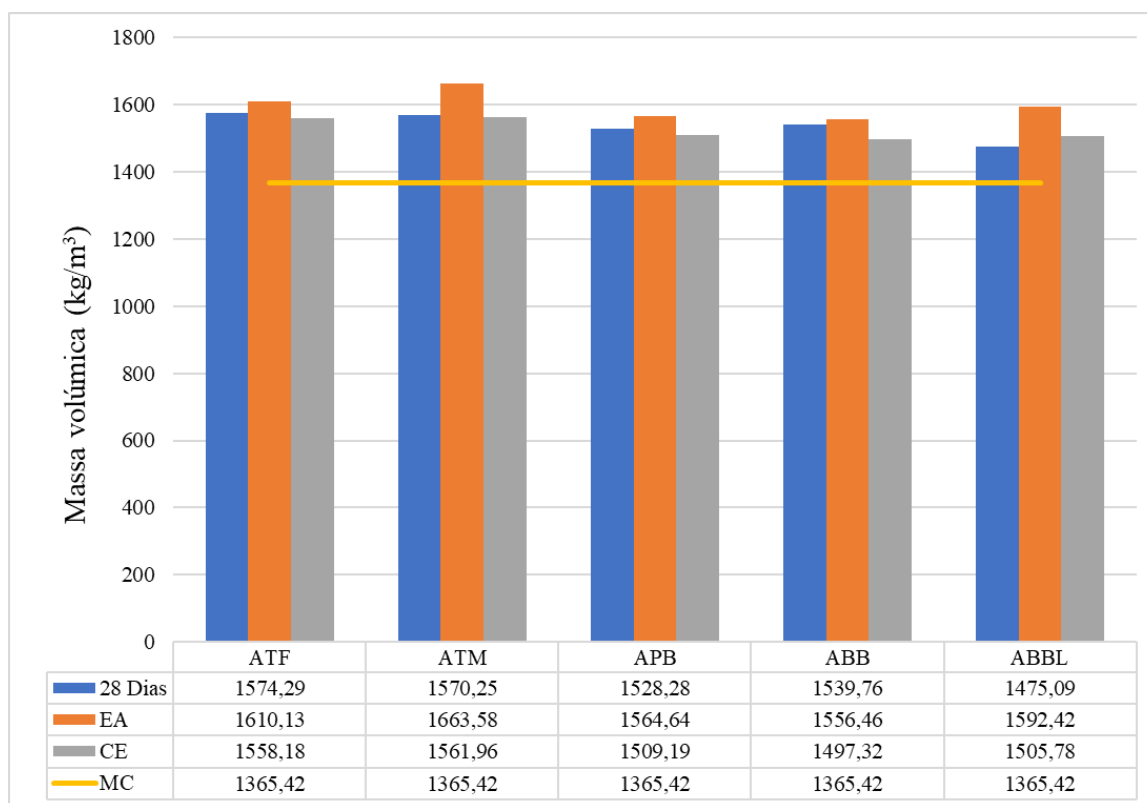


Figura 5.15 Comparação da massa volúmica (argamassas diferentes tipos de curas)

Comparando as argamassas endurecidas nos substratos, pode-se observar que o envelhecimento acelerado fez com que a massa volúmica aumentasse e a cura exterior fez com que reduzisse, em relação à massa volúmica da argamassa com cura de 28 dias.

O aumento da massa volúmica da argamassa sujeita ao envelhecimento acelerado em relação a argamassa com cura normal de 28 dias, também foi observado por Torres (2014) em argamassa de cimento e pré-doseada.

Para a porosidade aberta (figura 5.16), o envelhecimento acelerado fez com que a porosidade tivesse a mesma ordem de grandeza da argamassa endurecida nos substratos aos 28 dias e a cura exterior fez com que a porosidade aberta aumentasse.

As argamassas aplicadas nos substratos cerâmicos sujeitas ao envelhecimento acelerado e cura exterior tiveram valores inferiores de porosidade aberta em relação às argamassas aplicadas nos substratos de betão, mantendo a tendência das argamassas aplicadas nos substratos com 28 dias de cura.

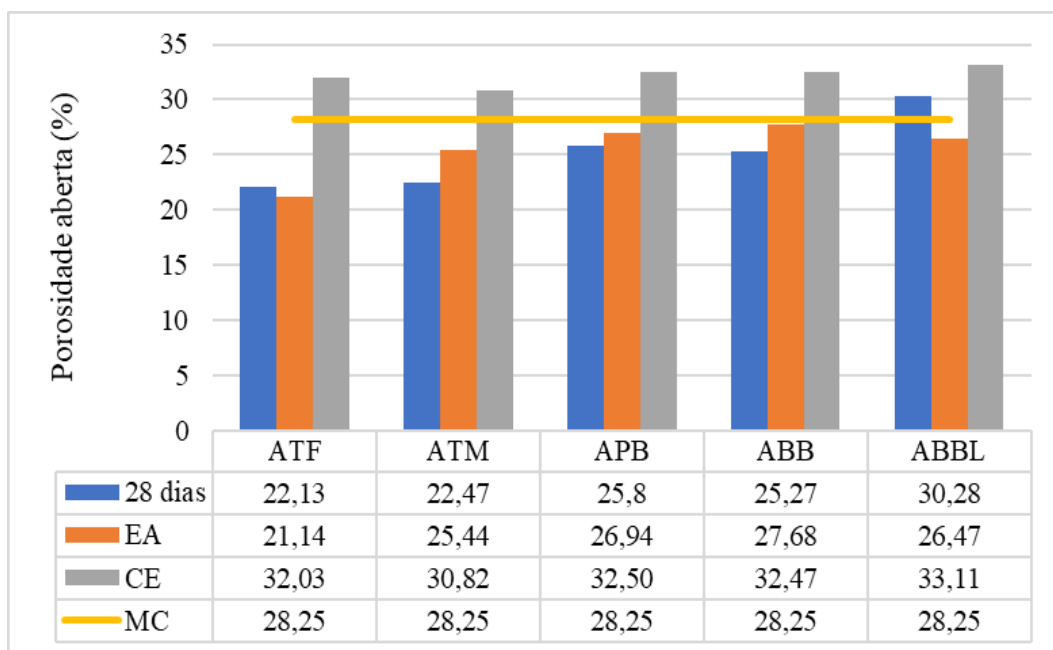


Figura 5.16 Comparação porosidade aberta (argamassas diferentes tipos de curas)

Em relação a porosimetria por intrusão de mercúrio pode-se observar que tanto o envelhecimento acelerado quanto a cura de 300 dias no exterior influenciaram a argamassa aplicada. A tabela 5.21 e as figuras 5.17 a 5.21 mostram a comparação ao longo do tempo.

O desenvolvimento da curva de distribuição dos poros permanece semelhante, com exceção da argamassa aplicada no bloco de betão leve, que apresenta um pico de poros em uma faixa diferente (entre 1 e 10 μm) no caso do envelhecimento acelerado.

Pela tabela 5.21 não é possível observar uma tendência clara na alteração da distribuição dos poros entre as argamassas envelhecidas em função dos substratos, quando comparados com a argamassa endurecida aos 28 dias.

Tabela 5.21 Porosimetria por intrusão de mercúrio ao longo do tempo

Argamassas	Volume de intrusão (ml/g)				Diâmetro médio dos poros (μm)
	0.025-0.01 (μm)	0.01-0.05 (μm)	0.05-10 (μm)	>10 (μm)	
ABB	0,026	0,409	1,231	0,816	0,268
ABB EA	0,000	0,443	1,036	0,737	0,330
ABB CE	0,000	0,242	1,201	0,795	1,280
ABBL	0,054	0,425	1,113	0,913	0,184
ABBL EA	0,000	0,448	1,584	0,268	0,330
ABBL CE	0,000	0,444	1,171	0,881	0,420
APB	0,021	0,403	1,135	1,060	0,304
APB EA	0,000	0,416	1,500	0,343	0,350
APB CE	0,000	0,475	0,959	1,166	0,390
ATF	0,025	0,540	0,925	0,900	0,191
ATF EA	0,004	0,364	1,375	0,515	0,350
ATF CE	0,001	0,374	1,187	0,720	0,350
ATM	0,013	0,275	1,268	0,606	0,340
ATM EA	0,002	0,360	1,291	0,440	0,330
ATM CE	0,006	0,354	0,928	0,928	0,350
MC	0,075	0,602	1,220	1,383	0,161

Porém, é possível notar um aumento no diâmetro médio dos poros das argamassas submetidas ao envelhecimento em comparação com a argamassa endurecida aos 28 dias. A argamassa submetida a cura exterior propiciou um maior diâmetro dos poros para todos os casos.

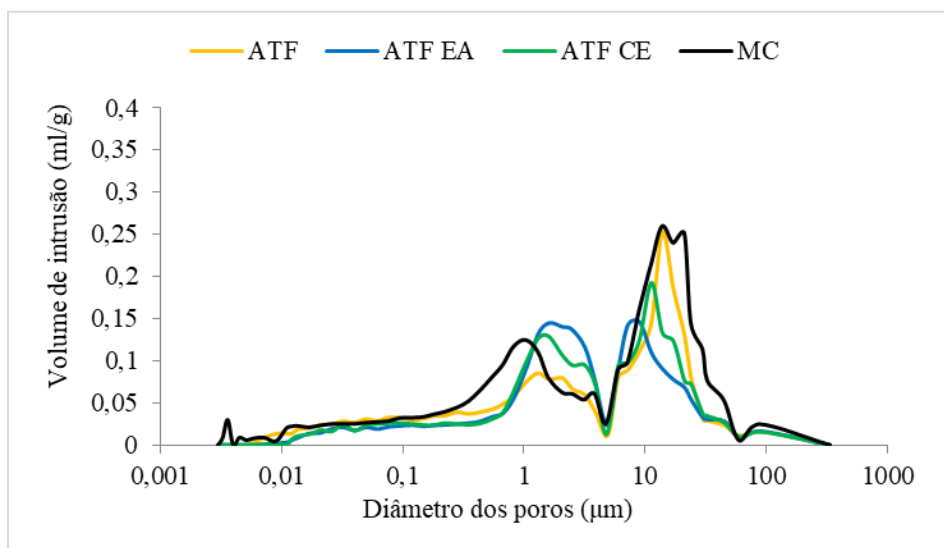


Figura 5.17 Porosimetria por intrusão de mercúrio (ATF; ATF EA; ATF CE; MC)

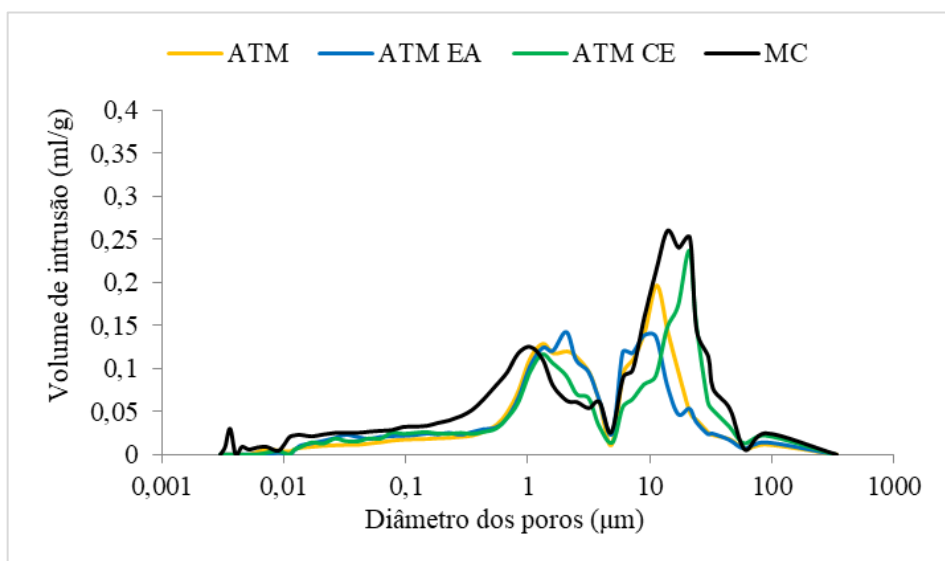


Figura 5.18 Porosimetria por intrusão de mercúrio (ATM; ATM EA; ATM CE; MC)

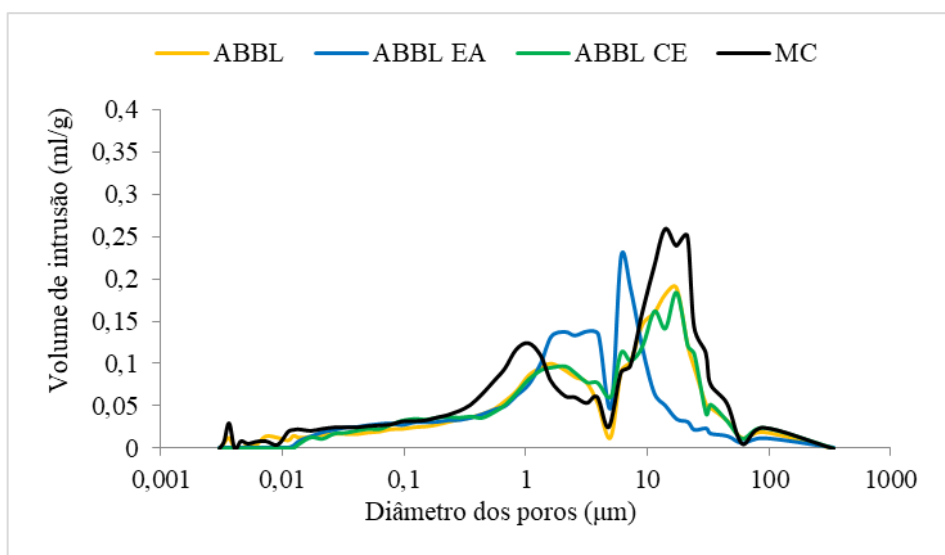


Figura 5.19 Porosimetria por intrusão de mercúrio (ABBL; ABBL EA; ABBL CE; MC)

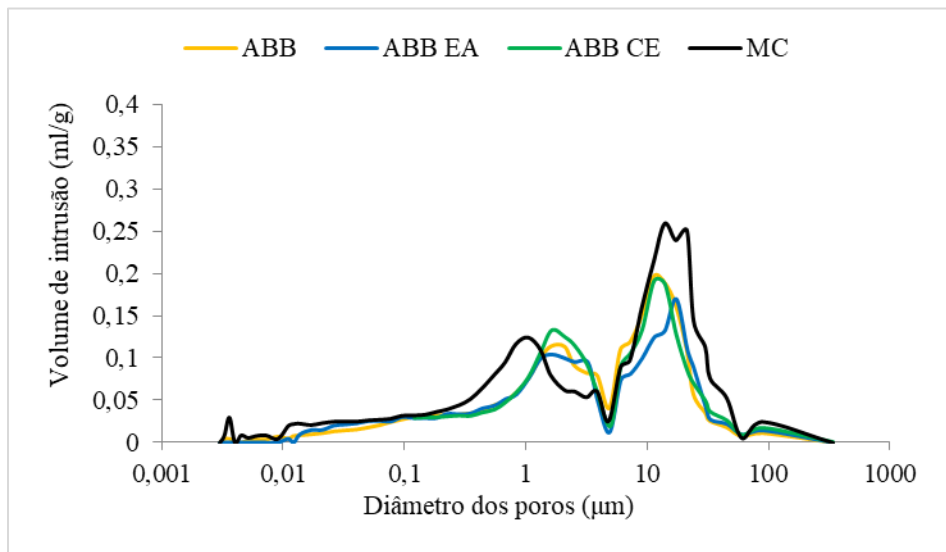


Figura 5.20 Porosimetria por intrusão de mercúrio (ABB; ABB EA; ABB CE; MC)

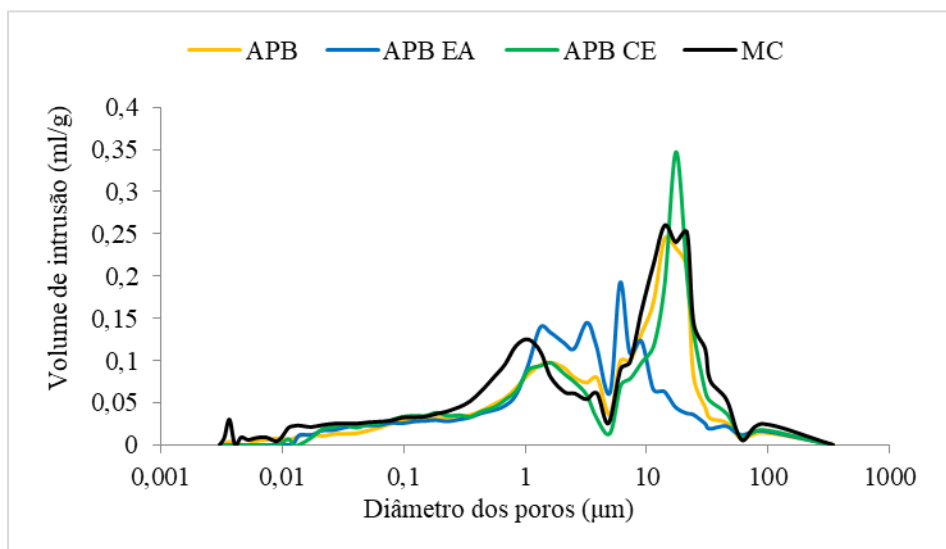


Figura 5.21 Porosimetria por intrusão de mercúrio (APB; APB EA; APB CE; MC)

Nas figuras 5.22 a 5.24 são apresentados os gráficos comparativos dos valores obtidos para o coeficiente de absorção por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e índice de secagem, para as argamassas endurecidas nos moldes, argamassas aplicadas com cura de 28 dias, argamassas aplicadas sujeitas a envelhecimentos acelerado e argamassas aplicadas com cura no exterior.

Em relação ao coeficiente de absorção de água por capilaridade, o envelhecimento acelerado e a cura exterior impuseram um aumento deste parâmetro, em relação à argamassa endurecida no molde, com exceção da argamassa ATM EA que possui uma porosidade aberta menor e a mesma ordem de grandeza de poros na banda capilar.

No caso da cura exterior, esta tendência está de acordo com a porosidade aberta, que para as argamassas aplicadas em todos os substratos teve um aumento, apesar de apresentarem um percentual menor de poros na faixa de influência capilar. Percebe-se a necessidade da distribuição de poros (porosimetria) ser analisada em conjunto com a porosidade aberta.

Comparando a argamassa endurecida nos substratos, verifica-se que o envelhecimento acelerado e a cura exterior provocaram o aumento da capacidade de absorção capilar da argamassa quando comparada com a argamassa endurecida nos substratos aos 28 dias.

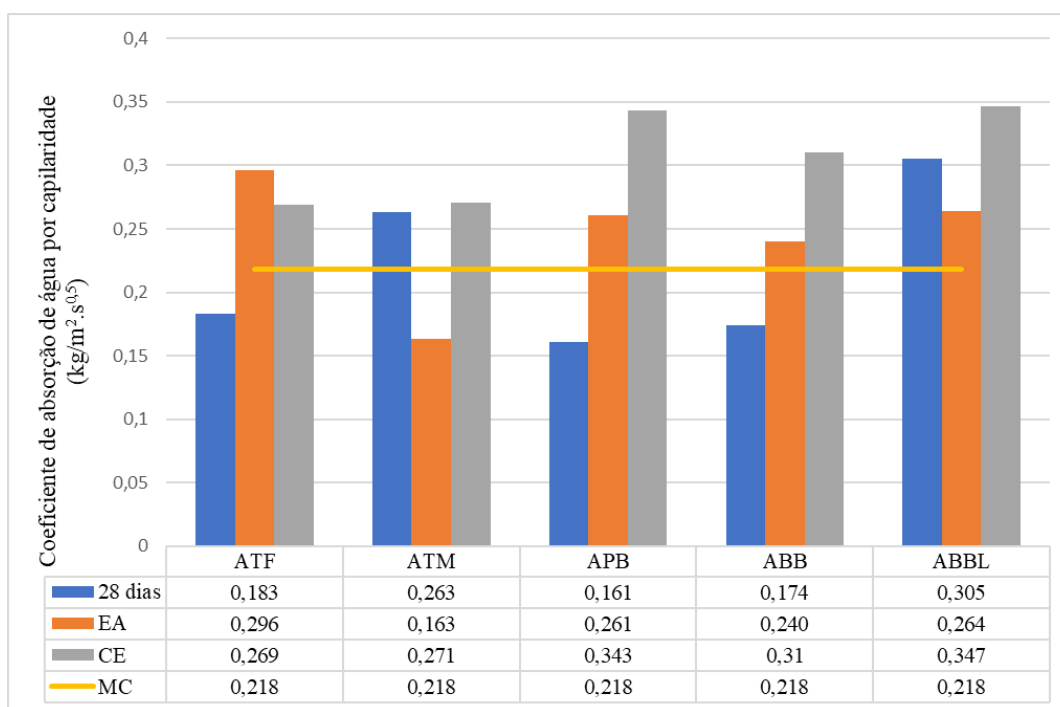


Figura 5.22 Comparação coeficiente de absorção por capilaridade (argamassas diferentes tipos de curas)

Em relação à permeabilidade ao vapor de água pode-se perceber que comparando as argamassas envelhecidas com a argamassa endurecida no molde, manteve-se o aumento acompanhado do aumento do diâmetro dos poros, tornando a argamassa mais permeável ao vapor de água.

Na comparação das argamassas endurecidas nos substratos, o envelhecimento acelerado não teve uma tendência tão clara, tendo em vista que para algumas argamassas o coeficiente aumentou e para outras reduziu em comparação com a argamassa com 28 dias de cura. Essa diferença nos resultados pode ter sido causada pelo próprio método de obtenção do provete destacado, que pode ter induzido microfissuras e assim ter influenciados os resultados.

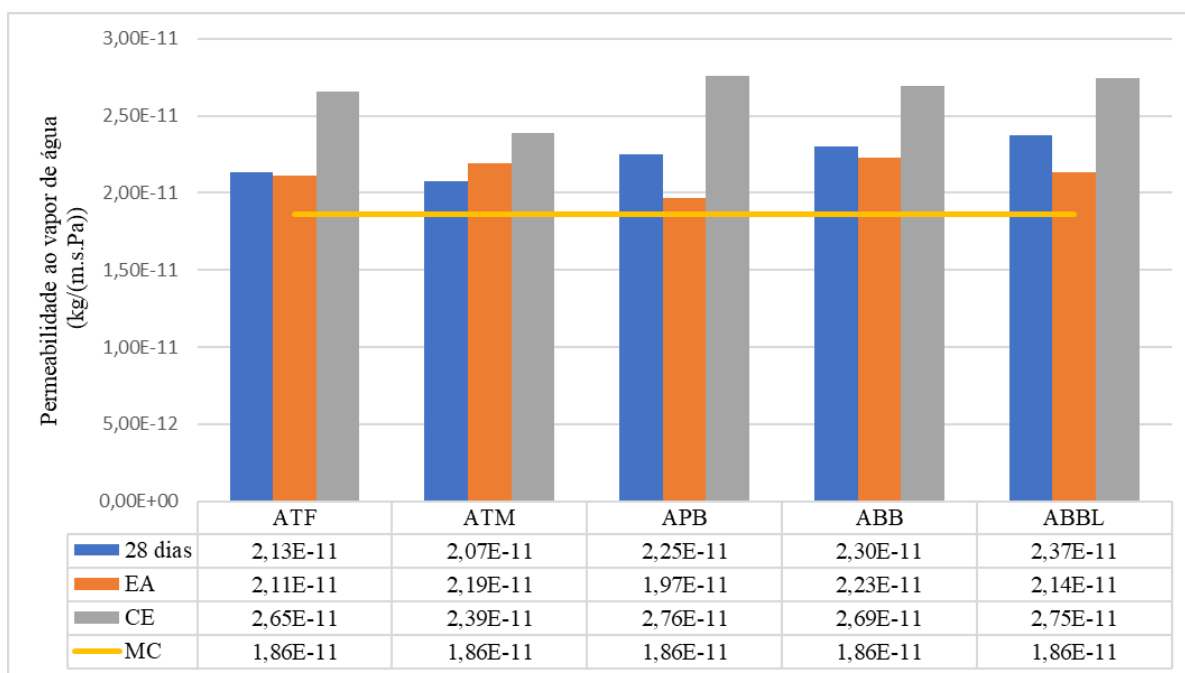


Figura 5.23 Comparação permeabilidade ao vapor de água (argamassas diferentes tipos de curas)

Em relação ao índice de secagem, em geral, as argamassas com envelhecimento artificial tiveram uma secagem mais rápida quando comparada com a argamassa endurecida no molde normalizado, mantendo a tendência da permeabilidade ao vapor de água.

Na comparação entre as argamassas endurecidas nos substratos aos 28 dias com a cura exterior, não houve uma tendência clara. A argamassa aplicada no bloco de betão teve um índice de secagem menor o que indica uma secagem ligeiramente mais rápida, as argamassas aplicadas na placa de betão e no tijolo maciço não apresentaram diferenças e a argamassa aplicada no tijolo furado e no bloco de betão leve apresentaram uma secagem mais lenta.

Dentro de todas as diferenças, apenas as argamassas aplicadas no bloco de betão apresentam um comportamento incoerente, tendo em vista que ocorre um aumento na proporção de poros grandes, que influenciam no transporte de vapor, da porosidade aberta e da permeabilidade ao vapor. Todos os outros apresentam relações coerentes entre as propriedades.

Comparando as argamassas com 28 dias de cura com as argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado, em geral, a secagem das mesmas foi mais rápida, com a exceção da argamassa aplicada no tijolo furado, que teve uma secagem mais lenta. Tal facto está coerente com o aumento/redução do percentual da faixa de poros maiores, que influenciam no transporte do vapor de água.

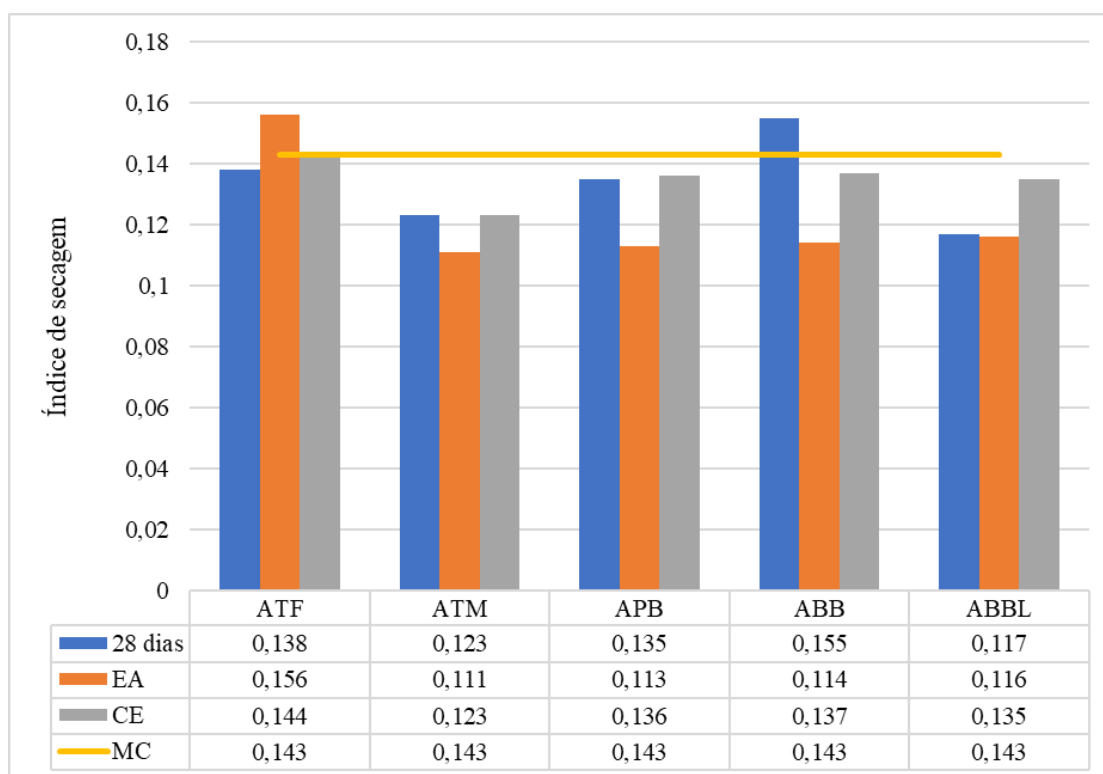


Figura 5.24 Comparação índice de secagem (argamassas diferentes tipos de curas)

Na figura 5.25 apresentam-se os resultados da comparação dos valores obtidos para a resistência à compressão. Continua a verificar-se o aumento da resistência à compressão da argamassa sujeita ao envelhecimento acelerado em relação à argamassa endurecida no molde normalizado.

Para as argamassas endurecidas nos substratos, pode-se perceber que a resistência à compressão das argamassas com 28 dias de cura exterior, pode estar relacionada com a porosidade aberta. O aumento da porosidade aberta em todos os casos induziu a redução da resistência à compressão.

No caso das argamassas com envelhecimento acelerado e das argamassas com 28 dias de cura, também é possível fazer a mesma relação. Como se tem, para alguns casos, valores próximos de porosidade aberta, verificam-se também valores próximos para a resistência à compressão.

Pode-se notar que para todos os casos as argamassas aplicadas nos substratos cerâmicos tiveram valores mais elevados de resistência à compressão, o que é coerente com a menor porosidade aberta em relação aos substratos de betão.

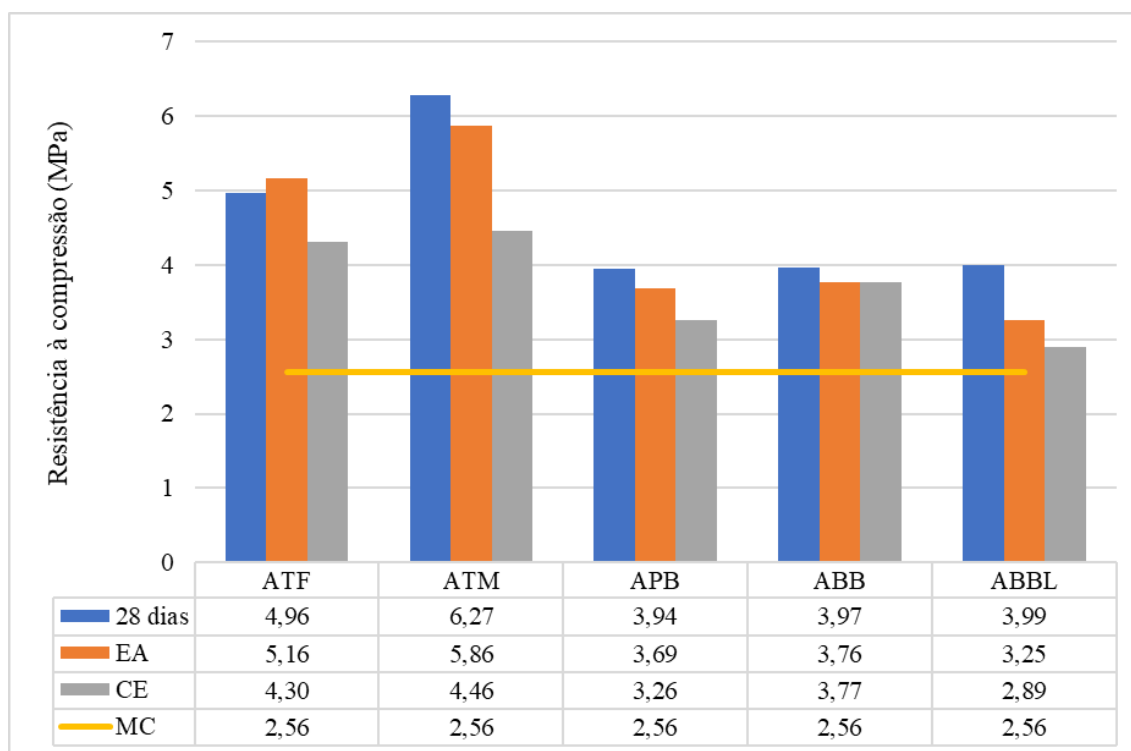


Figura 5.25 Comparação resistência à compressão (argamassas diferentes tipos de curas)

Na figura 5.26 é apresentada a comparação dos valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. Para todos os casos da argamassa sujeita a envelhecimento acelerado, em comparação com a argamassa endurecida no molde normalizado, ocorre um aumento desta propriedade. O que é coerente com a resistência à compressão.

Comparando as argamassas endurecidas nos substratos, pode-se perceber que para as argamassas com 28 dias, em comparação com as argamassas com cura exterior ocorre um ligeiro aumento do módulo de elasticidade para todas as argamassas em todos os substratos. O que não era esperado. Tal fato pode ser justificado pela sensibilidade do método de ensaio a microfissuras e defeitos que podem existir.

No caso da argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado, em comparação com as argamassas com os 28 dias, ocorre um ligeiro decréscimo, em geral. O que é coerente com a resistência à compressão.

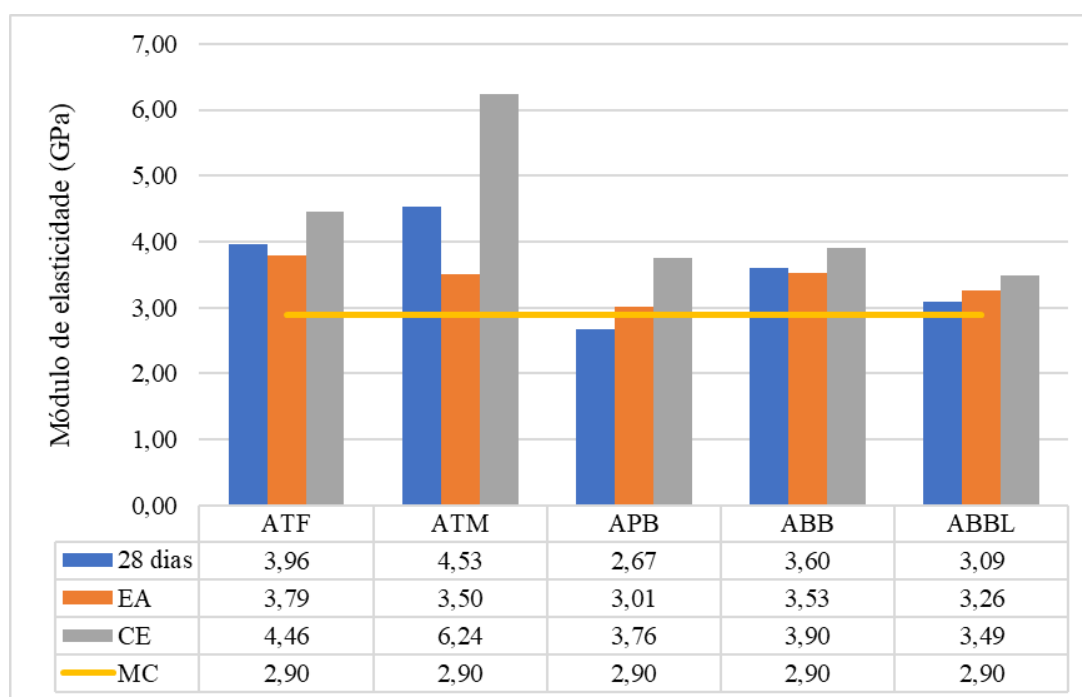


Figura 5.26 Comparação módulo de elasticidade - ultrassom (argamassas diferentes tipos de curas)

A natureza do envelhecimento acelerado ou natural, pode levar a uma certa degradação do material e com isso podem aparecer microfissuras que prejudicam a execução do ensaio e as respectivas conclusões.

Para compreender se os resultados da evolução ao longo do tempo da argamassa aplicada mantêm as tendências da argamassa endurecida aos 28 dias, foi realizada a análise de variância não paramétrica (Kruskal-Wallis) que identifica diferenças estatisticamente significativas entre os provetes da argamassa endurecida sujeita ao envelhecimento acelerado e a cura exterior,

devido o número de provetes e a não confirmação da normalidade dos dados. Para a análise da diferença entre os grupos optou-se pelo *Post-Hoc* de Dunn. A análise foi realizada para a massa volúmica, porosidade aberta, coeficiente de absorção por capilaridade, índice de secagem e resistência à compressão. Não foi possível obter a quantidade de elementos necessária para as outras propriedades, conforme indicado anteriormente no capítulo 3.

O teste de Kruskal-Wallis para as argamassas endurecidas nos substratos sujeitas ao envelhecimento acelerado (tabela 5.22) e sujeitas a cura exterior (tabela 5.23) tem como hipótese H0: as medianas são iguais e H1: as medianas são diferentes. Como o Valor-*p*, para todos os casos, foi inferior a 0,05 é possível rejeitar a hipótese H0 e assumir que pelo menos um grupo é diferente dos demais. Para identificar as diferenças entre os grupos foi realizado o *Post-Hoc* de Dunn para cada propriedade.

Tabela 5.22 Resultado do Kruskal-Wallis (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

	<i>H</i>	<i>gl</i>	Valor- <i>p</i>
Massa volúmica	38,0	4	<,001
Porosidade aberta	39,2	4	<,001
Coeficiente absorção de água por capilaridade	31,2	4	<,001
Índice de secagem	24,3	4	<,001
Resistência à compressão	37,6	4	<,001

Tabela 5.23 Resultado do Kruskal-Wallis (argamassas sujeitas à cura exterior)

	<i>H</i>	<i>gl</i>	Valor- <i>p</i>
Massa volúmica	25,3	4	<,001
Porosidade aberta	22,5	4	<,001
Coeficiente absorção de água por capilaridade	36,9	4	<,001
Índice de secagem	15,8	4	<,001
Resistência à compressão	27,4	4	<,001

Para a massa volúmica das argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.24) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa (Valor-*p* > 0,05) para os grupos APB EA/ABB EA, APB EA/ABBL EA, ABBL EA/ATF EA e ATF EA/ATM EA.

Tabela 5.24 Post-Hoc Dunn - Massa volúmica (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

		ABB EA	ABBL EA	APB EA	ATF EA	ATM EA
ABB EA	Valor- <i>p</i>	-	0,020	0,545	<,001	<,001
ABBL EA	Valor- <i>p</i>		-	0,070	0,246	<,001
APB EA	Valor- <i>p</i>			-	<,001	<,001
ATF EA	Valor- <i>p</i>				-	0,056

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Para a massa volúmica das argamassas sujeitas a cura exterior o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.25) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa (Valor-*p* > 0,05) para os grupos APB CE / ABB CE / ABBL CE e ATF CE / ATM CE.

Tabela 5.25 Post-Hoc Dunn - Massa volúmica (argamassas sujeitas a cura exterior)

		ABB CE	ABBL CE	APB CE	ATF CE	ATM CE
ABB CE	Valor- <i>p</i>	-	0,459	0,692	<,001	<,001
ABBL CE	Valor- <i>p</i>		-	0,715	<,001	<,001
APB CE	Valor- <i>p</i>			-	<,001	<,001
ATF CE	Valor- <i>p</i>				-	0,689

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Para a porosidade aberta das argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.26) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa (Valor-*p* > 0,05) entre as argamassas aplicadas aos substratos de betão (ABB EA/APB EA/ABBL EA) e aos substratos cerâmicos (ATF EA/ATM EA).

Tabela 5.26 Post-Hoc Dunn - Porosidade aberta (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

		ABB EA	ABBL EA	APB EA	ATF EA	ATM EA
ABB EA	Valor- <i>p</i>	-	0,070	0,273	<,001	<,001
ABBL EA	Valor- <i>p</i>		-	0,462	<,001	0,031
APB EA	Valor- <i>p</i>			-	<,001	<,001
ATF EA	Valor- <i>p</i>				-	0,139

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Para a porosidade aberta das argamassas sujeitas a cura exterior o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.27) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa ($\text{Valor-}p > 0,05$) entre as argamassas aplicadas aos substratos de betão (ABB CE / APB CE / ABBL CE) e ao grupo ATF CE / ABB CE.

Tabela 5.27 Post-Hoc Dunn - Porosidade aberta (argamassas sujeitas a cura exterior)

		ABB CE	ABBL CE	APB CE	ATF CE	ATM CE
ABB CE	Valor- <i>p</i>	-	0,075	0,587	0,543	<,001
ABBL CE	Valor- <i>p</i>		-	0,211	0,002	0,031
APB CE	Valor- <i>p</i>			-		<,001
ATF CE	Valor- <i>p</i>				-	0,022

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Para o coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado, o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.28) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa entre as argamassas aplicadas aos substratos de betão (ABB EA/APB EA/ABBL EA) e os grupos ATF EA/ABBL EA e ATF EA/APB EA.

Tabela 5.28 Post-Hoc Dunn – Coeficiente de absorção de água por capilaridade (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

		ABB EA	ABBL EA	APB EA	ATF EA	ATM EA
ABB EA	Valor- <i>p</i>	-	0,243	0,337	<,05	<,05
ABBL EA	Valor- <i>p</i>		-	0,835	0,108	<,001
APB EA	Valor- <i>p</i>			-	0,070	<,001
ATF EA	Valor- <i>p</i>				-	<,001

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

No caso das argamassas sujeitas a cura exterior, o coeficiente de absorção de água por capilaridade, o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.29) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa ($\text{Valor-}p > 0,05$) entre as argamassas aplicadas aos substratos de betão (ABB CE /APB CE e ABBL CE / APB CE) e os grupos ATF CE/ATM CE.

Tabela 5.29 Post-Hoc Dunn – Coeficiente de absorção de água por capilaridade (argamassas sujeitas a cura exterior)

		ABB CE	ABBL CE	APB CE	ATF CE	ATM CE
ABB CE	Valor- <i>p</i>	-	0,027	0,054	0,023	0,025
ABBL CE	Valor- <i>p</i>		-	0,735	<,001	<,001
APB CE	Valor- <i>p</i>			-	<,001	<,001
ATF CE	Valor- <i>p</i>				-	0,975

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Para o Índice de secagem das argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado, o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.30) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa (Valor-*p* > 0,05) entre as argamassas aplicadas aos substratos de betão (ABB EA/APB EA/ABBL EA) e os grupos ATM EA/ABB EA, ATM EA/APB EA e ATM EA/ABBL EA.

Tabela 5.30 Post-Hoc Dunn – Índice de secagem (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

		ABB EA	ABBL EA	APB EA	ATF EA	ATM EA
ABB EA	Valor- <i>p</i>	-	0,661	0,826	<,001	0,585
ABBL EA	Valor- <i>p</i>		-	0,503	<,001	0,319
APB EA	Valor- <i>p</i>			-	<,001	0,737
ATF EA	Valor- <i>p</i>				-	<,001

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Para o Índice de secagem, das argamassas sujeitas a cura exterior, o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.31) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa (Valor-*p* > 0,05) entre as argamassas aplicadas aos substratos de betão (ABB CE / APB CE / ABBL CE) e os grupos ATF CE / ABB CE, ATF CE / APB CE e ATF CE / ABBL CE.

Tabela 5.31 Post-Hoc Dunn – Índice de secagem (argamassas sujeitas a cura exterior)

		ABB CE	ABBL CE	APB CE	ATF CE	ATM CE
ABB CE	Valor- <i>p</i>	-	0,698	0,761	0,150	0,012
ABBL CE	Valor- <i>p</i>		-	0,919	0,081	0,049
APB CE	Valor- <i>p</i>			-	0,082	0,028
ATF CE	Valor- <i>p</i>				-	<,001

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Para a resistência à compressão, das argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado, o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.32) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa (Valor-*p* > 0,05) entre as argamassas aplicadas aos substratos de betão (ABB EA / APB EA / ABBL EA) e os grupos ATF EA / ABBL EA, ATF EA / ATM EA.

Tabela 5.32 Post-Hoc Dunn – Resistência à compressão (argamassas sujeitas ao envelhecimento acelerado)

		ABB EA	ABBL EA	APB EA	ATF EA	ATM EA
ABB EA	Valor- <i>p</i>	-	0,099	0,838	<,001	<,001
ABBL EA	Valor- <i>p</i>		-	0,137	0,246	<,001
APB EA	Valor- <i>p</i>			-	<,001	<,001
ATF EA	Valor- <i>p</i>				-	0,450

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Para a resistência à compressão das argamassas sujeitas a cura exterior, o *Post-Hoc* de Dunn (tabela 5.33) indica não haver uma diferença estatisticamente significativa (Valor-*p* > 0,05) entre as argamassas aplicadas aos substratos de betão (ABB CE / APB CE / ABBL CE) e ATF CE/ATM CE.

Tabela 5.33 Post-Hoc Dunn – Resistência à compressão (argamassas sujeitas a cura exterior)

		ABB CE	ABBL CE	APB CE	ATF CE	ATM CE
ABB CE	Valor- <i>p</i>	-	0,061	0,324	0,024	0,012
ABBL CE	Valor- <i>p</i>		-	0,527	<,001	<,001
APB CE	Valor- <i>p</i>			-	0,003	<,001
ATF CE	Valor- <i>p</i>				-	0,593

Nota: Em negrito Valor-*p* > 0,05.

Com a análise dos dados percebe-se que não existe diferença estatisticamente significativa para as argamassas aplicadas aos blocos de betão (BB, PB e BBL). De certa forma, manteve-se a tendência de separação entre os grupos, argamassa aplicada nos substratos cerâmicos e de betão, observada na argamassa endurecida aos 28 dias e sujeita a cura normalizada.

Em resumo, o envelhecimento acelerado ou natural manteve as principais tendências encontradas na argamassa endurecida aos 28 dias. A porosidade aberta e a permeabilidade ao vapor de água das argamassas endurecidas nos substratos de betão são superiores a porosidade aberta das argamassas endurecidas nos substratos cerâmicos. Apesar dos ciclos de envelhecimento acelerado poderem não corresponder ao tempo do envelhecimento natural (Parracha et al., 2002; Obrzut et al., 2020).

5.4. Síntese do capítulo

Os resultados obtidos demonstraram que as argamassas endurecidas nos substratos apresentaram um desempenho diferente do da argamassa endurecida nos moldes normalizados. O que indica que os substratos influenciam as características da argamassa aplicada.

Essas diferenças foram analisadas pelo teste estatístico ANOVA e são diferenças estatisticamente significativas.

Essa influência dos substratos pode ser dividida em 3 grupos: substratos cerâmicos (TF e TM); substratos de betão (PB e BB); e betão com agregados leves (BBL).

A principal característica dos substratos cerâmicos que influencia a argamassa é a absorção por capilaridade que conduz a argamassas menos porosas. A principal característica dos substratos de betão que influencia a argamassa é a porosidade aberta, resultando numa argamassa com maior permeabilidade ao vapor de água. Não foi possível identificar uma principal característica do bloco de betão leve com uma tendência clara de alteração no desempenho da argamassa aplicada.

Em geral, a massa volúmica aumenta, a porosidade aberta diminui, o coeficiente de absorção por capilaridade diminui, o índice de secagem diminui, a permeabilidade ao vapor de água aumenta, a resistência à compressão aumenta e o módulo de elasticidade dinâmico aumenta. Porém o valor relativo de aumento ou redução das propriedades depende do tipo de substrato.

O envelhecimento da argamassa (natural ou artificial) pode ser traduzido num aumento da porosidade aberta e do diâmetro médio dos poros da argamassa, tal fato acaba por influenciar as demais propriedades. Portanto, o tipo de substrato deve ser considerado como uma variável na determinação das características da argamassa.

No próximo capítulo, por meio de algoritmos de aprendizagem de máquina, é realizada a predição das características do substrato em função das características da argamassa aplicada.

6 ALGORITMOS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

6.1 Algoritmos no modo de classificação

6.2 Algoritmos no modo de regressão

6.3 Síntese do capítulo

6. Algoritmos de aprendizagem de máquina

Este capítulo tem como objetivo utilizar algoritmos de aprendizagem de máquina para prever as características do substrato, visando obter as características do substrato mais adequado para a argamassa em estudo.

Conforme discutido nos capítulos anteriores, o substrato exerce influência nas características da argamassa industrial aplicada. Portanto essas características não dependem exclusivamente da formulação da argamassa industrial e para atingir o desempenho esperado é necessário considerar o tipo de substrato onde a argamassa será aplicada. Então, o substrato deve ser considerado como uma variável adicional na formulação da argamassa industrial. A figura 6.1 ilustra o resumo do trabalho realizado na tese até a análise com os algoritmos de aprendizagem de máquina.

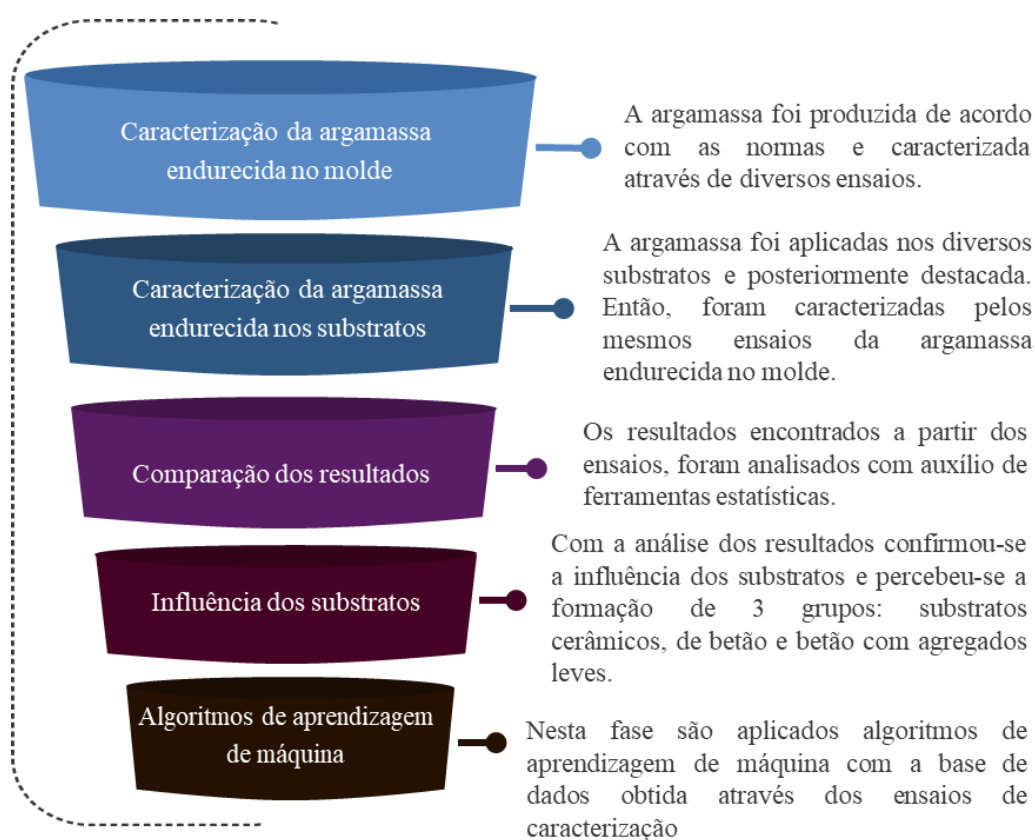


Figura 6.1 Resumo do trabalho realizado

Assim sendo, pretende-se prever os valores das características do substrato mais adequado (porosidade aberta, massa volúmica, coeficiente de absorção por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água) com base nas características da argamassa após aplicação, com a utilização de inteligência artificial.

Para isso, foram utilizados algoritmos de aprendizagem de máquina para realizar a previsão das características do substrato dadas as características da argamassa. Foi utilizada a base de dados dos resultados obtidos na campanha experimental aos 28 dias de cura.

Utilizaram-se uma média de 410 valores por propriedade, sem a exclusão dos *outliers*. Os valores individuais que compõem a base de dados estão discriminados no anexo D.

As propriedades da argamassa que foram utilizadas como atributos do modelo foram: massa volúmica, porosidade aberta, coeficiente de absorção por capilaridade, índice de secagem e resistência à compressão.

Apesar da permeabilidade ao vapor de água ser uma propriedade importante para as argamassas, não foi possível atingir uma quantidade suficiente de provetes na campanha experimental, apenas se obtiveram 24 valores. Essa quantidade não é compatível com a quantidade obtida nas outras propriedades. Tal fato invalidou que a permeabilidade ao vapor de água fosse utilizada como atributo nos algoritmos de aprendizagem de máquina.

Neste contexto, foram utilizados algoritmos no modo classificação e regressão. O modo classificação foi utilizado com o objetivo de classificar em qual substrato a argamassa obteve as características dadas como entrada no modelo. O modo regressão foi utilizado para prever as características do substrato dada as características da argamassa.

A simbologia utilizada neste capítulo mesma é idêntica à utilizada nos capítulos anteriores, sendo: **Substratos** - **PB**: Placa de betão; **BB**: Bloco de betão; **BBL**: Bloco de betão leve; **TM**: Tijolo maciço; **TF**: Tijolo furado.

6.1. Algoritmos no modo de classificação

Foram avaliados os algoritmos *Artificial Neural Network* (ANN), *Support Vector Machine* (SVM) e *Random Forest* (RF), em modo de classificação.

A figura 6.2 mostra o esquema do modelo criado no *Orange*. Neste esquema é possível perceber os *widgets* utilizados: *Data table* (utilizado para visualização dos dados de entrada); *Data sampler* (que divide aleatoriamente a base de dados numa proporção escolhida); *Neural network*, *RF* e *SVM* (Os algoritmos utilizados); *Test and Score* (utilizado na avaliação dos algoritmos); *Prediction* (utilizado na predição da classificação) e *Confusion matrix* (utilizado para a construção da matriz de confusão).

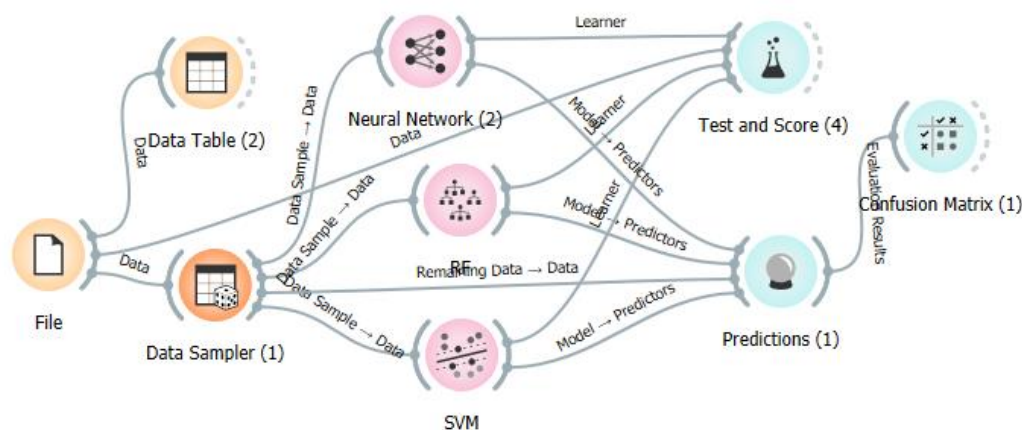


Figura 6.2 Esquema de criação do modelo de classificação no *Orange*

Na tabela 6.1 observam-se as métricas dos resultados da avaliação com a técnica de validação cruzada com o método *k-fold* e um *k* igual a 20.

A técnica de validação cruzada divide os dados em um determinado número de partes (*folds*). O algoritmo é avaliado retirando-se um *fold* de cada vez; o modelo é induzido a partir dos *folds* restantes e o *fold* retirado serve como teste. Isto é repetido para todos os *folds*.

Para a execução da avaliação, treinamento dos algoritmos, foi utilizado o *widget* Test and Score do *software Orange* (Gladshiva e Sharmila, 2021).

Tabela 6.1 Resultados da avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina

Modelo	AUC	CA	F1	Precisão	Sensibilidade
SVM	0,982	0,878	0,878	0,879	0,878
RF	0,984	0,886	0,885	0,885	0,886
ANN	0,985	0,898	0,898	0,898	0,898

Conforme descrito no capítulo 3:

- **AUC** (Área sob a curva ROC) é a área sob a curva de operação do recetor, é a área sob a curva formada pelo gráfico entre a taxa de registos positivos, que são positivos (TP) e a taxa de falsos positivos (FP);
- **CA** (Acurácia) é a percentagem de amostras corretamente classificados, é a divisão de todos os registos classificados corretamente pelo total;
- **F1** é a média harmónica entre precisão e sensibilidade;
- **Precisão** é a proporção de verdadeiros positivos (TP) entre as instâncias classificadas como positivas (TP + FP);
- **Sensibilidade** é a proporção de verdadeiros positivos (TP) entre todas as instâncias positivas nos dados (TP + FN).

Onde: verdadeiro positivo (TP) indica a quantidade de dados classificados como positivos de forma correta; verdadeiro negativo (TN) indica a quantidade de dados classificados como negativos corretamente; falso positivo (FP) é a quantidade de valores classificados como positivo de maneira incorreta e falso negativo (FN) é a quantidade de valores classificados como negativos incorretamente.

Pode-se perceber, pela tabela 6.1, que o desempenho dos algoritmos de aprendizagem de máquina é bem similar, todas as métricas possuem a mesma ordem de grandeza. Logo, é possível considerar que todos os algoritmos testados são adequados para a base de dados utilizada. Porém, o ANN (Precisão = 0,898) foi ligeiramente superior aos outros.

Então, os dados da tabela de entrada foram separados aleatoriamente em 2/3 para alimentar os algoritmos (treino) e 1/3 para teste. Foi realizada a predição dos dados separados para teste com *widget* Predictions. A tabela 6.2 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 6.2 Resultado da classificação dos algoritmos de aprendizagem de máquina

Modelo	AUC	CA	F1	Precisão	Sensibilidade
SVM	0,990	0,906	0,907	0,909	0,906
RF	0,987	0,985	0,884	0,887	0,885
ANN	0,984	0,892	0,892	0,894	0,892

Verifica-se que apesar dos resultados serem próximos o SVM mostrou os melhores resultados na classificação. Como 1/3 dos dados da base foi separado para teste, percebe-se que o SVM possui um desempenho superior para um conjunto menor de dados do que o RF e o ANN.

Para analisar os resultados foi elaborada a matriz de confusão (tabelas 6.3, 6.4 e 6.5) para todos os algoritmos. A matriz de confusão mostra o percentual de acerto e erro entre o resultado real e o resultado previsto, em verde estão as classificações correta e em vermelho as classificações incorretas para cada classe.

Com a matriz de confusão (tabela 6.3), pode-se perceber que o algoritmo *Support Vector Machine* (SVM) classificou 100% certo os substratos de bloco de betão leve e o molde, obtendo também excelente classificação para o tijolo furado 91,4%, bloco de betão 90% e tijolo maciço 88,9%. Porém a placa de betão teve um percentual de acerto de 77,8%.

Conclui-se também que o substrato de tijolo maciço não foi erroneamente classificado como de betão e apenas 2,9% dos substratos de tijolo furado foram “confundidos” com substrato de betão (placa de betão).

Tabela 6.3 Matriz de confusão SVM

		Percentual Previsto						Σ
		BB	BBL	Molde	PB	TF	TM	
Percentual Real	BB	90,0%	0,0%	0,0%	7,4%	0,0%	0,0%	20
	BBL	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	29
	Molde	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10
	PB	10,0%	0,0%	0,0%	77,8%	2,9%	0,0%	24
	TF	0,0%	0,0%	0,0%	11,1%	91,4%	11,1%	37
	TM	0,0%	0,0%	0,0%	3,7%	5,7%	88,9%	19
	Σ	20	29	10	27	35	18	139

Isto significa que com os dados da caracterização da argamassa (massa volúmica, porosidade aberta, resistência à compressão, índice de secagem e absorção por capilaridade), utilizados como atributos do modelo, o algoritmo previu qual substrato deu origem a esses dados. Como 1/3 dos dados são retirados da base de dados, possui-se a informação completa (qual substrato e os valores da argamassa para cada característica) e com isso, é possível perceber o percentual de acerto e erro dos algoritmos nessa classificação.

A tabela 6.4 mostra a matriz de confusão para o *Random Forest* (RF). No caso do algoritmo RF, pode-se perceber que nenhum substrato foi classificado com 100% de precisão. O tijolo maciço teve o menor percentual de acerto da classificação 76,2%, em relação aos demais. Porém o BBL obteve 96,7% de acerto e o molde 90,9%. O maior percentual de erro de TF e TM ocorreu entre eles e BB apenas teve erro de classificação em relação a PB. Isto significa que 13,6% dos dados que na realidade eram bloco de betão, o algoritmo classificou como placa de betão.

Tabela 6.4 Matriz de confusão RF

		Percentual Previsto					Σ	
		BB	BBL	Molde	PB	TF		TM
Percentual Real	BB	86,4%	0,0%	0,0%	7,4%	3,1%	0,0%	20
	BBL	0,0%	96,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	29
	Molde	0,0%	0,0%	90,9%	0,0%	0,0%	0,0%	10
	PB	13,6%	0,0%	0,0%	87,0%	0,0%	4,8%	24
	TF	0,0%	0,0%	9,1%	13,0%	90,6%	19,0%	37
	TM	0,0%	3,3%	0,0%	0,0%	6,2%	76,2%	19
	Σ	20	29	10	27	35	18	139

A tabela 6.5 mostra a matriz de confusão para o ANN. No caso do algoritmo ANN, pode-se perceber que apenas o molde metálico foi classificado com 100% de precisão. O bloco de betão obteve o menor percentual de acerto (78,3%), sendo classificado como placa de betão em 21,7% dos dados. O BBL teve a correta classificação em 96,6% dos dados. A placa de betão obteve 81,8% dos dados classificados corretamente, sendo classificado de forma errada com bloco de betão, bloco de betão leve e tijolo cerâmico furado. Em relação aos substratos cerâmicos o tijolo cerâmico maciço foi classificado como tijolo cerâmico furado em 15% dos dados e o tijolo cerâmico furado teve a correta classificação em 94,3% dos dados.

Tabela 6.5 Matriz de confusão ANN

		Percentual Previsto						Σ
		BB	BBL	Molde	PB	TF	TM	
Percentual Real	BB	78,3%	0,0%	0,0%	9,1%	0,0%	0,0%	20
	BBL	0,0%	96,6%	0,0%	4,5%	0,0%	0,0%	29
	Molde	0,0%	0,0%	100%	0,0%	0,0%	0,0%	10
	PB	21,7%	0,0%	0,0%	81,8%	2,9%	0,0%	24
	TF	0,0%	0,0%	0,00%	4,5%	94,3%	15,0%	37
	TM	0,0%	3,4%	0,0%	0,0%	2,9%	85,0%	19
	Σ	20	29	10	27	35	18	139

Como conclusão, todos os algoritmos confundiram BB com PB e TF com TM, além de um alto percentual de acerto para BBL (superior a 96%) e Molde metálico (100% - ANN e SVM; 90,9% - RF). Tal fato já era esperado e reforça a conclusão anterior da formação de 4 grupos de influência: molde normalizado, substrato de betão, substrato cerâmicos e substrato de betão leve.

Portanto, pode-se concluir que é possível prever em qual substrato a argamassa foi aplicada, quando se possui parâmetros de caracterização da argamassa ou qual o substrato mais adequado para atingir características de desempenho pretendidas da argamassa. Para essa base de dados o SVM obteve o melhor desempenho.

6.2. Algoritmos no modo de regressão

O objetivo da utilização dos algoritmos de regressão é quantificar as características dos substratos com base nos dados da argamassa. Tendo em vista que as características do substrato influenciam o comportamento da argamassa, deve-se ter em conta este fator quando pretende-se atingir um desempenho específico para argamassa aplicada.

Em relação aos algoritmos de regressão, foram utilizados o *Artificial Neural Network (ANN)*, *SVM* e *RF*, no modo de regressão. Para efeito de comparação também foi utilizado o modelo estatístico de regressão linear (RL).

A avaliação dos algoritmos foi realizada com a técnica de validação cruzada, com o *widget Test and Score*, já descrito na seção anterior e posteriormente os dados da tabela de entrada foram

aleatoriamente separados em 2/3 para treinamento dos algoritmos e 1/3 para teste, utilizando-se o *widget Predictions*.

A base de dados foi a mesma utilizada para a classificação e possui 410 elementos por atributo e está inserida no Anexo D.

A figura 6.3 mostra o esquema do modelo de regressão gerado no Orange. Neste esquema é possível perceber os *widgets* utilizados: *Data table* (utilizado para visualização dos dados de entrada); *Data sampler* (que divide aleatoriamente a base de dados numa proporção escolhida); *Neural network*, *RF*, *SVM* e *Linear regression* (os algoritmos utilizados); *Test and Score* (utilizado na avaliação dos algoritmos) e *Prediction* (utilizado na predição da regressão).

Os resultados da avaliação e da predição são apresentados separadamente para cada característica do substrato (porosidade aberta, massa volúmica, permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de absorção de água).

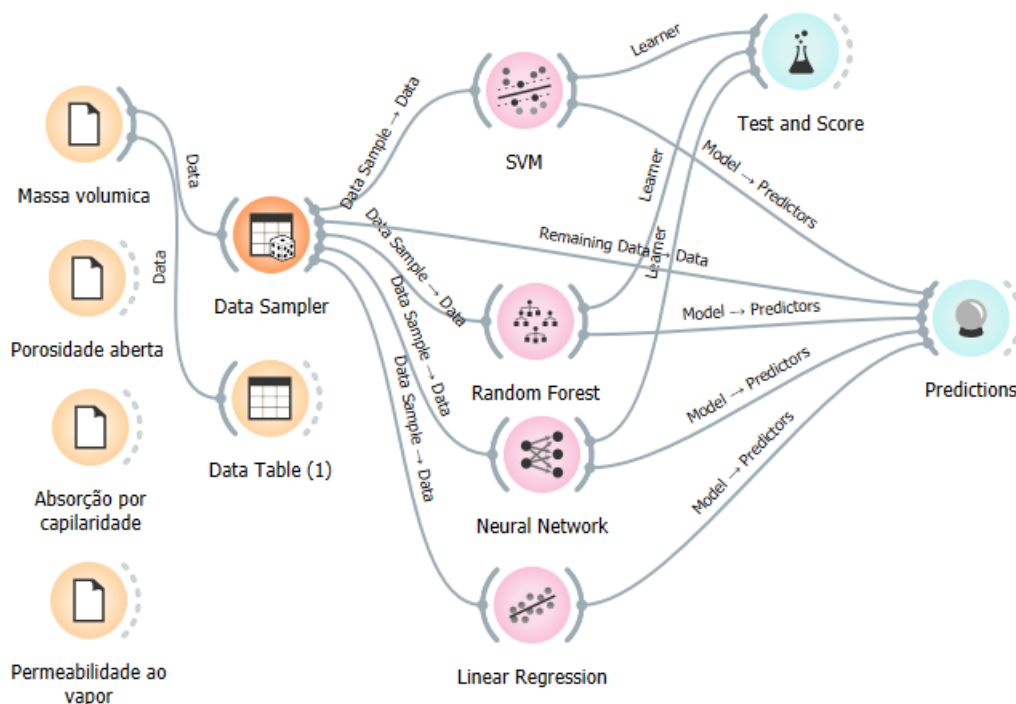


Figura 6.3 Esquema de criação do modelo de regressão no Orange

Para a avaliação da performance dos algoritmos, segue a simbologia, conforme descrito no capítulo 3:

- **MAE** (erro absoluto médio) representa a diferença entre os valores originais e previstos extraídos pela média da diferença absoluta sobre o conjunto de dados;
- **MSE** (erro quadrático médio) representa a diferença entre os valores originais e previstos extraídos pelo quadrado da diferença média sobre o conjunto de dados;
- **RMSE** (Raiz do erro quadrático médio) é a taxa de erro pela raiz quadrada de MSE;
- **R²** (coeficiente de determinação) representa o coeficiente de quão bem os valores se ajustam em comparação com os valores originais. Os valores variam de 0 a 1. Quanto mais alto for o valor, melhor será o modelo.

6.2.1. Porosidade aberta do substrato

As tabelas 6.6 e 6.7 explicitam os resultados da avaliação e do teste dos algoritmos de aprendizagem de máquina utilizados.

Tabela 6.6 Resultado da avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R ²
SVM	3,135	1,771	1,026	0,879
RF	1,873	1,369	0,579	0,928
ANN	1,187	1,090	0,682	0,954
RL	7,046	2,654	2,159	0,728

Pode-se perceber que o modelo ANN obteve, em geral, os menores valores de erro e o maior valor do coeficiente de determinação (R^2), e assim, o melhor desempenho dentro os algoritmos avaliados. Na comparação da avaliação com a regressão linear, percebe-se que este modelo estatístico obteve o pior desempenho.

Então, os dados da tabela de entrada foram separados aleatoriamente em 2/3 para alimentar os algoritmos (treino) e 1/3 para teste. Foi realizada a predição dos dados separados para teste com *widget Predictions*.

Tabela 6.7 Resultado da predição da porosidade aberta do substrato

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R ²
SVM	1,945	1,395	0,869	0,907
RF	3,139	1,772	0,664	0,850
ANN	1,163	1,079	0,678	0,944
RL	5,796	2,407	1,967	0,723

Pode-se perceber que o algoritmo *Artificial Neural Network (ANN)* obteve o melhor desempenho na predição da porosidade do substrato com R² de 0,944 e as outras métricas de erro inferior aos restantes algoritmos. Como ocorreu na avaliação dos modelos, a regressão linear apresentou o pior desempenho com R² = 0,723.

Isto significa que com os conjuntos de valores da caracterização da argamassa é possível prever o valor da porosidade aberta do substrato com um coeficiente de determinação de 0,944.

Para ilustrar o desempenho do ANN, a figura 6.4 mostra o gráfico dos resultados reais x os resultados previstos pelo algoritmo ANN. Nota-se um coeficiente de correlação (R = 0,97) forte entre os dados.

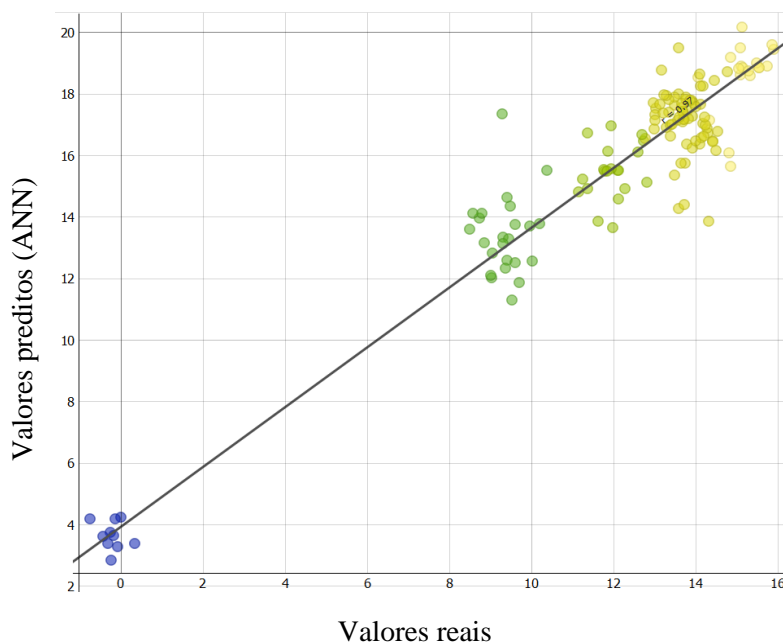


Figura 6.4 Porosidade aberta do substrato (valores preditos x valores reais) – ANN (Imagem retirada do *software Orange*)

6.2.2. Coeficiente de absorção de água por capilaridade do substrato

As tabelas 6.8 e 6.9 explicitam os resultados da avaliação e do teste dos algoritmos de aprendizagem de máquina utilizados.

Tabela 6.8 Resultado da avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R^2
SVM	0,007	0,084	0,068	0,620
RF	0,005	0,074	0,037	0,709
ANN	0,005	0,068	0,041	0,752
RL	0,015	0,123	0,105	0,191

De acordo com a tabela 6.7, o algoritmo *ANN* obteve o melhor desempenho na avaliação, por meio do método de validação cruzada, com o R^2 de 0,752 e menores valores de erro.

Novamente os dados da tabela de entrada foram separados aleatoriamente em 2/3 para alimentar os algoritmos (treino) e 1/3 para teste. Foi realizada a predição do coeficiente de absorção de água dos substratos com *widjet Predictions* (tabela 6.8).

Tabela 6.9 Resultado da predição do coeficiente de absorção de água do substrato

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R^2
SVM	0,006	0,080	0,066	0,645
RF	0,004	0,065	0,036	0,767
ANN	0,003	0,057	0,036	0,821
RL	0,013	0,114	0,099	0,273

Pode-se perceber que o algoritmo *ANN* obteve o melhor desempenho para a predição do coeficiente de absorção de água por capilaridade do substrato com R^2 de 0,821, com os menores parâmetros de erro. Novamente a regressão linear mostrou-se inadequada para este tipo de previsão com $R^2 = 0,273$.

Para ilustrar o desempenho do *ANN*, a figura 6.5 mostra o gráfico dos resultados reais x os resultados previstos pelo algoritmo *ANN*. Nota-se um coeficiente de correlação (R) de 0,91.

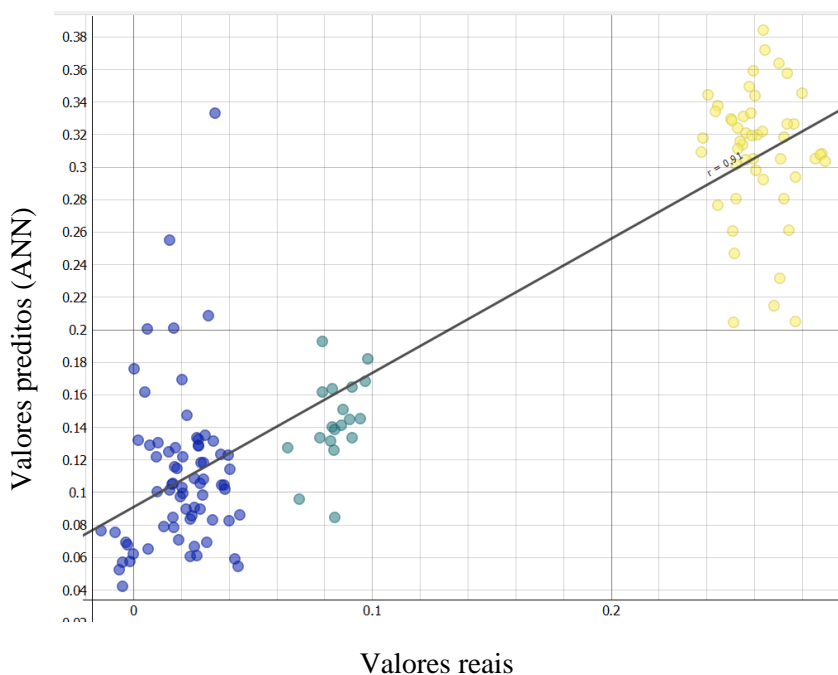


Figura 6.5 Coeficiente de absorção de água por capilaridade do substrato (valores preditos x valores reais) – ANN (Imagem retirada do *software Orange*)

6.2.3. Massa volúmica do substrato

As tabelas 6.10 e 6.11 explicitam os resultados da avaliação e do teste dos algoritmos de aprendizagem de máquina utilizados.

Na avaliação com o método de validação cruzada (tabela 6.10), percebe-se que o algoritmo *Random Forest* apresenta os menores valores de erro e maior valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,964$).

Tabela 6.10 Avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R^2
SVM	1,056	1,028	0,557	0,903
RF	0,393	0,627	0,251	0,964
ANN	0,428	0,654	0,364	0,961
RL	3,673	1,917	1,533	0,663

Pode-se perceber que o algoritmo *Random Forest* obteve o melhor desempenho (tabela 6.11) no treino/teste com o R^2 de 0,948, com os menores erros em relação aos restantes algoritmos.

Tabela 6.11 Resultado da predição da massa volúmica do substrato

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R^2
SVM	2,213	1,488	0,826	0,804
RF	0,594	0,770	0,341	0,948
ANN	0,881	0,939	0,511	0,922
RL	4,447	2,109	1,661	0,607

Para ilustrar o desempenho do *RF*, a figura 6.6 mostra o gráfico dos resultados reais x os resultados previstos pelo algoritmo *ANN*. Nota-se um coeficiente de correlação (R) de 0,97.

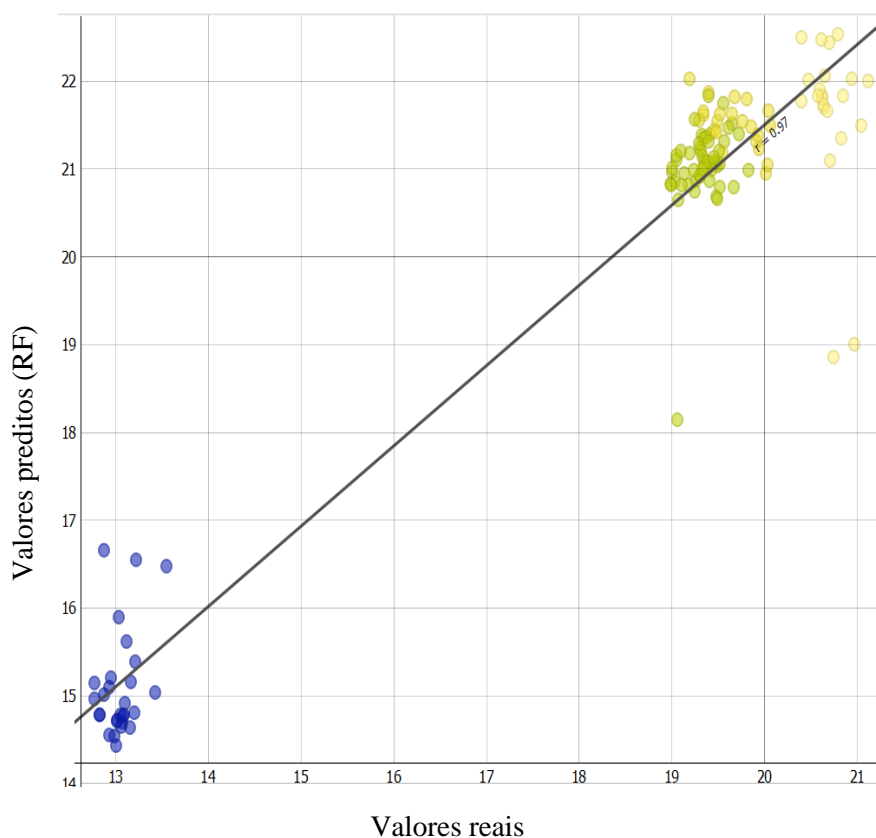


Figura 6.6 Massa volúmica do substrato (valores preditos x valores reais) – *RF* (Imagem retirada do *software Orange*)

6.2.4. Permeabilidade ao vapor de água do substrato

Os resultados obtidos na avaliação, pelo método de validação cruzada, e treino/teste dos algoritmos com a utilização dos *widjet Test and Score e Prediction* são expostos nas tabelas 6.12 e 6.13.

Na avaliação dos algoritmos (tabela 6.12) para a previsão da permeabilidade ao vapor de água dos substratos, o algoritmo *SVM* obteve o melhor desempenho com R^2 de 0,828 e os menores valores de erro em relação aos demais algoritmos. *RF* e *ANN* obtiveram o mesmo R^2 (0,799) e a regressão linear teve o pior desempenho ($R^2 = 0,276$).

Tabela 6.12 Avaliação dos algoritmos de aprendizagem de máquina

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R^2
SVM	0,073	0,270	0,163	0,828
RF	0,085	0,292	0,140	0,799
ANN	0,085	0,292	0,149	0,799
RL	0,307	0,554	0,467	0,276

Pode-se perceber que, na predição (tabela 6.13), o algoritmo *SVM* obteve o melhor desempenho com o R^2 de 0,899 com os menores erros em relação aos demais.

Tabela 6.13 Resultado da predição da permeabilidade ao vapor de água do substrato

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R^2
SVM	0,042	0,204	0,136	0,899
RF	0,068	0,262	0,129	0,835
ANN	0,069	0,263	0,129	0,833
RL	0,257	0,507	0,426	0,380

Para ilustrar o desempenho do *SVM*, a figura 6.7 mostra o gráfico dos resultados reais x os resultados previstos pelo algoritmo *SVM*. Nota-se um coeficiente de correlação (R) de 0,95.

Como conclusão pode-se afirmar que é possível prever as características do substrato com base em parâmetros da argamassa, com baixos erros e bons coeficientes de determinação ($R^2 > 0,82$).

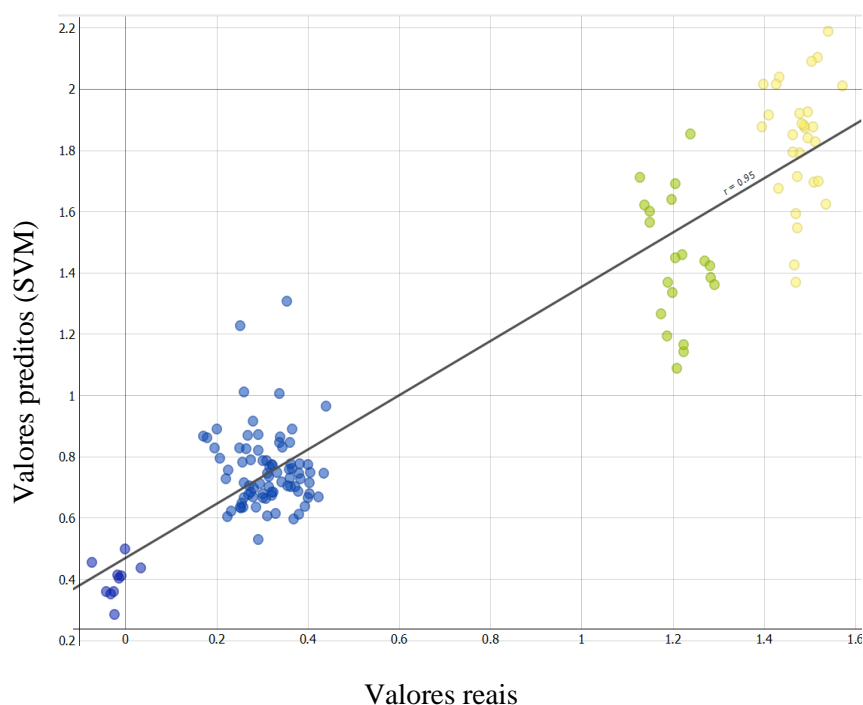


Figura 6.7 Permeabilidade ao vapor de água do substrato (valores preditos x valores reais) – SVM (Imagem retirada do *software Orange*)

Em geral, o *ANN* mostrou um melhor desempenho, porém para permeabilidade do substrato o *SVM* possui um desempenho superior e em relação a massa volúmica do substrato o *RF* foi ligeiramente superior ao *ANN*.

Cabe ressaltar que o modelo de regressão linear apresentou o pior desempenho em todos os parâmetros avaliados. Tal fato reforça o poder dos algoritmos de aprendizagem de máquina na previsão de atributos.

Porém, têm-se algoritmos com desempenho diferente para cada situação de estudo, o que cabe a avaliação e determinação do mais adequado para cada análise. A tabela 6.14, indica o algoritmo adequado para prever as características do substrato por propriedade.

Tabela 6.14 Algoritmos utilizados por propriedade do substrato

Algoritmo de aprendizagem de máquina	Propriedade do substrato
RF	Massa volúmica
ANN	Porosidade Aberta
ANN	Coefficiente de absorção de água por capilaridade
SVM	Permeabilidade ao vapor de água

6.2.5. Previsão das características do substrato com base nos atributos da argamassa

Conforme referido nos capítulos anteriores o substrato tem influência nas características da argamassa. Então, dada as características da argamassa que se pretende obter, quais seriam as características mais adequadas do substrato que possibilitariam atingir esses atributos pretendidos da argamassa?

Depois da avaliação e do treino/teste dos algoritmos com a base de dados, foram escolhidos os algoritmos *Artificial Neural Network* para a porosidade aberta e absorção por capilaridade, *Random Forest* para massa volúmica e *Support Vector Machine* para permeabilidade ao vapor de água, conforme indicado na tabela 6.14, para realizar as previsões das características do substrato.

Idealmente, como já verificado, procura-se que uma argamassa possua baixa porosidade aberta, baixa absorção por capilaridade, facilidade de secagem, baixa massa volúmica e uma resistência à compressão compatível com o substrato.

Portanto, dentro da base dados, que possui valores reais obtidos por meio dos ensaios de caracterização da argamassa em estudo, buscou-se uma combinação para esses requisitos.

Para isso, utilizou-se os valores médios obtidos da argamassa destacada aos 28 dias (tabela 6.15) com o objetivo de dado um desempenho hipotético que se pretende atingir, prever o valor das características de um substrato que possibilitaria atingir esse desempenho hipotético da argamassa, por meio dos algoritmos no modo de regressão, e dentro dos substratos estudados,

qual substrato seria o mais adequado considerando esse desempenho hipotético para essa argamassa, utilizado o algoritmo *SVM* no modo de classificação.

Tabela 6.15 Valores da argamassa para predição

Propriedade	Valor	Argamassa
Massa volúmica (kg/m ³)	1475,09	ABBL
Porosidade aberta (%)	22,13	ATF
Coefficiente de absorção por capilaridade (kg/m ² .s ^{0,5})	0,161	APB
Índice de secagem	0,123	ATM
Resistência à compressão (MPa)	2,56	MC

Portanto, com o auxílio dos algoritmos de aprendizagem de máquina, fez-se a previsão dos atributos do substrato para atingir o desempenho hipotético para esta argamassa (tabela 6.16).

Essas características obtidas se assemelham aos substratos de betão (tabela 6.17). Os substratos de betão possuem massa volúmica entre 2113 e 2224 kg/m³, com porosidade aberta entre 11,5% e 14,5%. Entretanto os parâmetros de absorção por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água se aproximam mais do substrato placa de betão.

Em relação aos substratos estudados, foi realizada a análise no modo de classificação com o algoritmo *SVM* e para essas características hipotéticas da argamassa o algoritmo classificou substrato como placa de betão.

Tabela 6.16 Predição das características do substrato

	Porosidade aberta (%)	Massa Volúmica (kg/m ³)	Coefficiente de absorção por capilaridade (kg/m ² .s ^{0,5})	Permeabilidade ao vapor de água (kg/m.s.Pa)
SVM	-	-	-	0,253E-11
RF	-	2102,87	-	-
ANN	11,37	-	0,050	-

Logo, essa argamassa industrial pode obter esse desempenho mais facilmente se aplicada a substratos de betão que possuam características entre a placa de betão e o bloco de betão. Dentro

dos substratos existentes, a placa de betão poderá proporcionar melhores características de desempenho para a argamassa em estudo.

Tabela 6.17 Valores médios dos substratos

Substratos	Porosidade aberta (%)	Massa Volúmica (kg/m ³)	Coefficiente de absorção por capilaridade (kg/m ² .s ^{0,5})	Permeabilidade ao vapor de água (kg/m.s.Pa)
BB	14,5	2113	0,332	1,465E-11
PB	11,5	2224	0,023	0,239E-11
TF	16,5	2071	0,037	0,397E-11
TM	18,4	2059	0,104	0,454E-11
BBL	16,8	1319	0,308	1,797E-11

Portanto, os algoritmos de aprendizagem de máquina podem auxiliar na melhoria do desempenho das argamassas quando se estima o substrato onde essa argamassa possuirá seu melhor desempenho, além de possibilitar um ajuste das características do substrato, criando substratos mais compatíveis.

Cabe ressaltar a limitação do estudo quando se utiliza um software com os algoritmos pré-definidos onde impossibilita um melhor ajuste e a utilização de outros recursos que possam melhorar o desempenho dos algoritmos. A base de dados pode ser considerada pequena no tangente a utilização da inteligência artificial para previsão de atributos e este fato pode ocasionar o *overfitting* dos dados.

Para extrapolar a análise, substratos de outros fabricantes devem ser utilizados, tendo em vista a variação do desempenho entre eles. Fatores como a rugosidade do substrato e distribuição dos poros, apesar de influenciarem nas características da argamassa aplicada, não foram considerados.

6.3. Síntese do capítulo

Neste capítulo foram utilizados algoritmos de aprendizagem de máquina para predizer as características do substrato, visando obter as características do substrato mais adequado para a argamassa em estudo.

Para isso foram utilizados os algoritmos em modo de classificação e regressão (*Random Forest* e *Support Vector Machine*). Além de utilizar-se modelo estatístico de regressão linear para comparação com os modelos de inteligência artificial.

Verificou-se que no modo classificação todos os algoritmos apresentaram um desempenho similar. Porém o *SVM* teve um desempenho superior para a base de dados utilizada.

Já no modo regressão os algoritmos utilizados apresentaram desempenho diferente para as propriedades estudadas. O *ANN* apresentou um melhor desempenho na predição da porosidade aberta e do coeficiente de absorção de água por capilaridade, o *SVM* para a permeabilidade ao vapor de água e o *RF* para a massa volúmica dos substratos. A regressão linear mostrou-se inadequada para o estudo com desempenho inferior aos algoritmos de aprendizagem de máquina.

Em relação ao substrato mais adequado, para um desempenho esperado da argamassa, conclui-se que o substrato mais adequado, que poderia propiciar esse desempenho é o substrato com características mais próximas do substrato de betão, nomeadamente a placa de betão.

7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 Enquadramento

7.2 Conclusão geral e específicas

7.3 Proposta para trabalhos futuros

7. Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1. Enquadramento

Atualmente, as argamassas de revestimento, após a sua formulação, são caracterizadas em laboratório, de acordo com as normas aplicáveis. Isso significa que são utilizados moldes padrões, metálicos, não porosos com dimensões pré-definidas para a realização dos ensaios laboratoriais.

Essa formulação e caracterização não considera os diferentes substratos onde a argamassa pode ser aplicada e apenas garante, no caso das argamassas industriais, um desempenho mínimo que deverá ser atingido, pela argamassa aplicada, nos diferentes substratos recomendados pelo fabricante recomenda sua utilização.

Devido à diferença de composição e características dos diversos substratos, é natural equacionar que o desempenho da argamassa aplicada possa ser diferente após aplicação em cada substrato.

O objetivo geral desta tese foi analisar a influência exercida por diferentes substratos no desempenho físico e mecânico de uma argamassa industrial aplicada. Além deste objetivo principal, este estudo teve como objetivos específicos identificar quais propriedades dos substratos que mais influenciam o desempenho das argamassas, quais características das argamassas que sofrem mais influência dos substratos, verificar se a influência do substrato se mantém ao longo do tempo e prever as características do substrato que poderiam permitir a otimização desta argamassa, sugerindo uma inovação no desenvolvimento de substratos mais adequados e compatíveis.

Para isso, foi escolhida uma argamassa de cimento industrial (pré-doseada) e cinco tipos de substratos (tijolo furado - TF, tijolo maciço - TM, placa de betão - PB, bloco de betão - BB e bloco de betão leve - BBL). Os substratos e a argamassa foram caracterizados separadamente e em seguida, a argamassa foi aplicada em todos os substratos e posteriormente destacada para caracterização. Foram analisados e comparados diversos processos de cura, nomeadamente, a cura tradicional de 28 dias, a cura de 28 dias seguida de envelhecimento acelerado e a cura de

28 dias seguida de 300 dias no exterior. Após a análise dos resultados obtidos concluiu-se que todos os objetivos propostos foram alcançados.

7.2. Conclusão geral e específicas

Dos resultados obtidos confirma-se a influência dos diferentes substratos nas características da argamassa industrial aplicada. De forma geral, pode dizer-se que a massa volúmica aumenta, a porosidade aberta diminui, o coeficiente de absorção por capilaridade diminui, o índice de secagem diminui, a permeabilidade ao vapor de água aumenta, a resistência à compressão aumenta e o módulo de elasticidade dinâmico aumenta, quando se compara a argamassa endurecida aplicada nos substratos com a argamassa endurecida nos moldes normalizados.

Também foi possível concluir que a influência dos substratos no desempenho da argamassa industrial pode ser dividida por tipo de substrato, neste caso, substratos cerâmicos, de betão e de betão com agregados leves. Tendo em vista que essas classes de substrato influenciam com diferente intensidade a argamassa aplicada.

Como principal característica dos substratos que modifica o desempenho da argamassa, cabe ressaltar a absorção de água por capilaridade para os substratos cerâmicos e a porosidade aberta para os substratos de betão. A absorção por capilaridade dos substratos cerâmicos induz a redução da disponibilidade de água na argamassa e como resultado, tem-se uma argamassa mais compacta, com maior massa volúmica e menor porosidade aberta, em relação ao molde.

No caso do substrato de betão a força capilar não é tão grande em comparação aos substratos cerâmicos, por influência do reduzido tamanho médio dos poros (BB = 0,076 μm ; PB = 0,058 μm ; TF = 0,166 μm ; TM = 0,480 μm) e menor quantidade de poros na faixa de absorção capilar (BB = 0,03 ml/g; PB = 0,09 ml/g; TF = 0,88 ml/g; TM = 1,2 ml/g). Com isso, a argamassa torna-se menos porosa do que a argamassa endurecida no molde normalizado, mas com porosidade aberta superior à argamassa endurecida em substratos cerâmicos. Porém, porosidade aberta é a principal característica do substrato que influencia no desempenho da argamassa aplicada e a principal influência na argamassa se dá na permeabilidade ao vapor de água. A argamassa aplicada nos substratos de betão torna-se mais permeável ao vapor do que as demais.

De forma individualizada, aos 28 dias, a argamassa aplicada no tijolo cerâmico furado (ATF), em relação à argamassa endurecida no molde, teve a massa volúmica aumentada em cerca de 15%, a porosidade aberta reduzida em cerca de 21%, o coeficiente de absorção por capilaridade reduzido em 16%, o índice de secagem reduzido em 3%, a permeabilidade ao vapor de água aumentou 14%, a resistência à compressão aumentou 93% e o módulo de elasticidade dinâmico aumentou 36%.

A argamassa aplicada no tijolo maciço (ATM) teve a massa volúmica aumentada em cerca de 15%, a porosidade aberta reduzida em 20%, o coeficiente de absorção por capilaridade aumentou 21%, o índice de secagem reduziu 14%, a permeabilidade ao vapor de água aumentou 11%, a resistência à compressão aumentou 144% e o módulo de elasticidade aumentou 56% em relação à argamassa endurecida no molde.

Percebe-se que os substratos cerâmicos tiveram a mesma tendência. Porém o tijolo maciço, que possui maior porosidade aberta do que o tijolo furado, cerca de 11%, e mais poros na faixa de influência de absorção de água por capilaridade ($TM = 1,2 \text{ ml/g}$ e $TF = 0,88 \text{ ml/g}$). Com isso, a distribuição dos poros das duas argamassas após aplicação foi levemente diferente ($ATM = 1,268 \text{ ml/g}$ e $ATF = 0,925 \text{ ml/g}$ na faixa de influência de absorção por capilaridade – 0,05 a 10 μm), mas o suficiente para que o coeficiente de absorção por capilaridade da argamassa aplicada ao tijolo maciço fosse maior ($ATM = 0,263 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ e $ATF = 0,183 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$).

Em relação à argamassa aplicada na placa de betão (APB), a massa volúmica aumentou cerca de 12%, a porosidade aberta reduziu em 8%, o coeficiente de absorção por capilaridade reduziu 26%, o índice de secagem reduziu 6%, a permeabilidade ao vapor de água aumentou 21%, a resistência à compressão aumentou 53% e o módulo de elasticidade reduziu 8%, após aplicação no substrato.

Para a argamassa aplicada no bloco de betão (ABB), a massa volúmica aumentou em 13%, a porosidade aberta reduziu em 10%, o coeficiente de absorção por capilaridade reduziu 20%, o índice de secagem aumentou 8%, a permeabilidade ao vapor de água aumentou 23,8%, a resistência à compressão aumentou 55,08% e o módulo de elasticidade aumentou 24,14%, em relação à argamassa endurecida no molde.

Já na argamassa aplicada no bloco de betão leve (ABBL), e após aplicação no substrato, a massa volúmica aumentou em 8%, a porosidade aberta aumentou em 7%, o coeficiente de absorção por capilaridade aumentou 40%, o índice de secagem reduziu 18%, a permeabilidade ao vapor de água aumentou 27%, a resistência à compressão aumentou 56% e o módulo de elasticidade aumentou 7%.

A argamassa aplicada no bloco de betão leve obteve alguns resultados inesperados, que podem ter relação com a heterogeneidade da composição do bloco, que conta com argila expandida. Tal fato pode ter influenciado a cinética de absorção e a formação da interface entre os materiais. Isso pode ter levado ao aumento discreto da massa volúmica em conjunto com o aumento da porosidade aberta da argamassa em comparação com a argamassa endurecida no molde.

Em relação à interface entre o substrato e a argamassa, para todos os casos, foi observada uma faixa de 1-2 mm junto ao substrato de uma camada mais compacta e com poros menores. Também foi possível visualizar a presença de pontos brancos na microtomografia de raios-X que indicam uma densificação possivelmente por uma concentração maior de ligante.

Pela combinação das análises de imagem (lupa estereoscópica, microtomografia de raios-X e microscópio eletrónico de varrimento) foi possível observar que na argamassa aplicada, a porosidade aumenta ao se afastar da interface enquanto na argamassa endurecida no molde essa porosidade aparenta ser mais bem distribuída ao longo do provete.

Ainda foi possível observar que a argamassa aplicada possui poros mais irregulares do que a argamassa endurecida no molde metálico, que apresenta poros mais arredondados. Porém, este fato pode não ser totalmente devido a influência do substrato, tendo em vista que fatores como a diferença de aplicação e espessura entre o molde e a argamassa aplicada também podem influenciar na saída do ar da argamassa. Tal fato, pode contribuir no formato dos poros, mas estes fatores não foram considerados neste estudo.

Na análise ao longo do tempo foi possível concluir que ocorre um aumento no diâmetro médio dos poros da argamassa aplicada, o que conduz a maior porosidade aberta e maior permeabilidade ao vapor de água para todos os casos, no geral, as tendências encontradas aos

28 dias de cura, para a argamassa aplicada, são mantidas. Logo, tem-se a mesma ordem de grandeza para as argamassas aplicadas nos substratos cerâmicos e nos substratos de betão.

Com isso, foi possível concluir que a forma de caracterização atual das argamassas não corresponde ao seu desempenho em serviço após aplicação nos substratos. Esta diferença de desempenho é identificada logo aos 28 dias de cura e, portanto, devem-se considerar os diferentes tipos de substratos como um fator importante no momento da formulação e determinação dos atributos das argamassas.

O estudo também mostra que a utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina é uma poderosa ferramenta na área das argamassas e que é possível atuar, não apenas, na formulação da argamassa, mas também na otimização do substrato onde a argamassa será aplicada.

Com o auxílio dos algoritmos de aprendizagem de máquina é possível prever, por meio de algoritmos de classificação, o substrato onde a argamassa foi aplicada ou em qual substrato a argamassa poderia atingir o desempenho que se pretende, e por meio de algoritmos de regressão, quais as características do substrato são mais adequadas dado as características da argamassa.

O substrato mais adequado para esta argamassa em estudo possui a porosidade aberta de 11,37%, a massa volúmica de 2102,87 kg/m³, o coeficiente de absorção de água por capilaridade de 0,050 ((kg/(m². s^{0,5}))) e a permeabilidade ao vapor de 0,253E-11 (kg/(m.s.Pa)).

Os resultados demonstraram que, dos substratos testados, a placa de betão é o substrato mais adequado para esta argamassa industrial em estudo, tendo em vista as características esperadas da argamassa.

Essa abordagem dupla de otimização (substrato e argamassa) possibilitará a produção de construções mais sustentáveis, duráveis e compatíveis. Uma vez que o substrato influencia no desempenho da argamassa, atuar na otimização do substrato que possibilite que o desempenho esperado da argamassa seja possível, é fundamental.

Portanto, os resultados corroboram que o substrato influencia nas características da argamassa aplicada. Essa argamassa tem um desempenho diferente do obtido na caracterização

normalizada. Tal fato, abre margem para otimização da formulação e possibilidade de redução da quantidade de ligante, o que possibilitaria uma argamassa mais sustentável.

Percebe-se também a importância da individualização da formulação da argamassa, tendo em vista que substratos cerâmicos e de betão possuem diferentes resultados. Logo, sugere-se que a argamassa seja formulada para diferentes conjuntos de substratos. Assim, espera-se aumentar o desempenho e compatibilização da argamassa em relação a uma argamassa de uso geral, baseada no desempenho mínimo exigido.

7.3. Proposta para trabalhos futuros

Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se:

A repetição do estudo com outras argamassas industriais e substratos de outros fabricantes para a extrapolação dos resultados encontrados.

A utilização da aplicação por projeção mecânica da argamassa nos substratos para reduzir a influência do aplicador da argamassa no substrato.

Realizar outros estudos para compreender a parcela de influência dos resultados da forma de construção dos provetes, tendo em vista que a espessura e área da argamassa aplicada são diferentes da argamassa endurecida nos moldes normalizados e isso influencia na carbonatação da argamassa e facilita a saída de ar.

Aumentar o número de amostras para obter-se uma melhor base de dados para as análises com os algoritmos de aprendizagem de máquina.

Repetir os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio com maior número de provetes para avaliar com mais precisão a diferença entre as porosidades e distribuição dos poros.

Desenvolver um fator de correção para a caracterização da argamassa em moldes metálicos normalizados considerando a alteração do desempenho proporcionada pela aplicação nos diferentes substratos.

Desenvolvimento e teste de um substrato com as características indicadas para confirmar o aumento do desempenho da argamassa aplicada.

Referências

Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Aboshama, A. Y. (2016). "Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete". *Construction and Building Materials*, 124, 866-877.

Antunes, R. P. D. N. (2005). "Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa". Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

APFAC. (2008). "Argamassas de reboco, monomassas e ETICS", Lisboa, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, 45 p.

Arandigoyen, M., Bernal, J. L. P., López, M. A. B., & Alvarez, J. I. (2005). "Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity". *Applied Surface Science*, v. 252, n. 5, p. 1449–1459.

Arromba, J. (2011). "Influência do suporte no desempenho de rebocos aplicados em suportes de tijolo e betão recorrendo a técnicas de ensaio in-situ". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção, Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.

Artioli, G., Cerulli, T., Cruciani, G., Dalconi, M. C., Ferrari, G., Parisatto, M., ... & Tucoulou, R. (2010). "X-ray diffraction microtomography (XRD-CT), a novel tool for non-invasive mapping of phase development in cement materials". *Analytical and bioanalytical chemistry*, 397(6), p. 2131-2136.

Asteris, P. G., Koopialipoor, M., Armaghani, D. J., Kotsonis, E. A., & Lourenço, P. B. (2021). "Prediction of cement-based mortars compressive strength using machine learning techniques". *Neural Computing and Applications*, 33(19), p. 13089-13121.

Azeredo, H. A. (2007). "O Edifício e Seu Acabamento". São Paulo, Blücher editora.

Barroso De Aguiar, J., & Cruz, M. D. (1998). "A study of the adhesion between hydraulic mortars and concrete". *Journal of adhesion science and technology*, 12(11), p. 1243-1251.

- Bellei P, Torres I, Flores-Colen I, Travincas R, Silveira D. (2021). "Study of cement mortars with different particle size sands after application to ceramic brick substrate". International Conference Construction, Energy, Environment e Sustainability. Coimbra, Portugal.
- Bernardes, E. E., Carrasco, E. V. M., Vasconcelos, W. L., & de Magalhães, A. G. (2015). "X-ray microtomography (μ -CT) to analyze the pore structure of a Portland cement composite based on the selection of different regions of interest". *Construction and Building Materials*, 95, p. 703-709.
- Bewick, V., Cheek, L., & Ball, J. (2004). "Statistics review 9: one-way analysis of variance". *Critical care*, 8(2), p. 1-7.
- Botas, S. M. (2009). "Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios". Dissertação Apresentada Para a Obtenção Do Grau Académico de Mestre Em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa. Portugal.
- Braga, A. D. P.; Carvalho, A. P. D. L. F. D.; Ludemir, T. B. (2007). "Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações". 2.ed. Rio de Janeiro: LTC editora.
- Braz, D., da Motta, L. M. G., & Lopes, R. T. (1999). "Computed tomography in the fatigue test analysis of an asphaltic mixture". *Applied Radiation and Isotopes*, 50(4), p. 661-671.
- Breiman, L. (2001). "Random forests". *Machine learning*, 45(1), p. 5-32.
- Brisard, S., Serdar, M., & Monteiro, P. J. (2020). "Multiscale X-ray tomography of cementitious materials: A review". *Cement and Concrete Research*, v. 128, p. 105824.
- Brito, V. (2009). "Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte". Dissertação Apresentada para obtenção Do Grau Académico de Mestre Em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Brown, W. C.; Dietrich, M.; Latimer, M. (2004) - "Assessing the impact of thickness on the performance of stucco cladding". Technical Series 04-123. Research Highlight. Ottawa: Canada Mortgage and Housing Corporation.

- Burlion, N., Bernard, D., & Chen, D. (2006). "X-ray microtomography: application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process". *Cement and Concrete research*, 36(2), p. 346-357.
- Campiteli, V. C., & Nasciso, G. da S. (2008). "Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia". *Ambiente Construído*, Porto Alegre, 8, p. 21–35.
- Candeias, A., Nogueira, P., Mirão, J., Silva, A., Veiga, R., & Casal, M. (2004). "Characterization of ancient mortars: present methodology and future perspectives". Chairmen of the European Research Councils - Chemistry Committees. Project Cathedral.
- Carasek, H. (1996). "Mecanismos e fatores intervenientes na aderência de argamassas à base de cimento Portland aplicadas sobre substratos porosos", Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de S. Paulo, 1996.
- Carasek, H. (2017). "Argamassas". In: Geraldo C. Isaia. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, (3ª Ed.). São Paulo: IBRACON, v. 2, cap. 28, p. 922-966.
- Carvalho Jr, A.N. (2005). "Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico", Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Brasil.
- Castro, O., Silva, J. M., Devezas, T., Silva, A., & Gil, L. (2010). "Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures". *Materials & Design*, 31(1). p. 425-432.
- CEN. (1998a). "Methods of test for mortar for masonry Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar". EN 1015-6. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (1999). "Methods of test for mortar for masonry – part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)". EN 1015-3, European Committee for Standardization, Brussels.

- CEN (2002). "Methods of test for mortar for masonry - Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates". EN 1015-21, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2004). "Testing Concrete - Part 4: Determination of Ultrasonic Pulse Velocity". EN 12504-4, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2013). "Conservation of cultural heritage: test methods: determination of drying properties". EN 16322, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2019). "Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar". EN 1015-11, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN. (2016). "Methods of test for mortar for masonry; Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates". EN 1015-12, European Committee for Standardization, Brussels.
- Cha, G. W., Moon, H. J., Kim, Y. M., Hong, W. H., Hwang, J. H., Park, W. J., & Kim, Y. C. (2020). "Development of a Prediction Model for Demolition Waste Generation Using a Random Forest Algorithm Based on Small DataSets". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), p. 6997.
- Chaabene, W. B., Flah, M., & Nehdi, M. L. (2020). "Machine learning prediction of mechanical properties of concrete: Critical review". *Construction and Building Materials*, 260, p. 119889.
- Cnudde, V., Boone, M., Dewanckele, J., Dierick, M., Van Hoorebeke, L., Jacobs, P. (2011). "3D characterization of sandstone by means of X-ray computed tomography". *Geosphere* 7 (1), p. 54–61.
- Cnudde, V., Masschaele, B., Dierick, M., Vlassenbroeck, J., Van Hoorebeke, L., & Jacobs, P. (2006). "Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool". *Applied Geochemistry*, 21, p. 826–832.
- Cortes C, Vapnik V (1995). "Support-vector networks". *Machine Learning*, 20(3), p. 273–297.

- Cosenza, D. N., Leite, H. G., Marcatti, G. E., Binoti, D. H. B., alcântara, A. D., & Rode, R. (2015). “Classificação da capacidade produtiva de sítios florestais utilizando máquina de vetor de suporte e rede neural artificial”. *Scientia Forestalis*, 43(108), p. 955-963.
- Costa, E. B. C., & John, V. M. (2011). “Aderência substrato-matriz cimentícia: estado da arte”. *Anais: IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (SBTA)*. 17 – 20 de maio, Belo Horizonte, Minas Gerais. Brasil.
- Costa, E. B. C., Kurokawa, F. A., & John, V. M. (2013). “Modelagem simplificada para estimativa do potencial de penetração de partículas em substratos porosos”. *Ambiente Construído*, 13, p. 25-34.
- Coutinho, A. de S. (1988). “Fabrico e Propriedades do Betão” - Volume 1 (2a Edição). Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- da Silva, Í. B. (2018). “X-ray Computed Microtomography technique applied for cementitious materials: A review”. *Micron*, 107, p. 1-8.
- Dedavid, B., Gomes, C. I., & Machado, G. (2007). “Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras”. Porto Alegre. Edipucrs editora.
- Demsar J, Curk T, Erjavec A, Gorup C, Hocevar T, Milutinovic M, Mozina M, Polajnar M, Toplak M, Staric A, Stajdohar M, Umek L, Zagar L, Zbontar J, Zitnik M, Zupan B (2013). “Orange: Data Mining Toolbox in Python”, *Journal of Machine Learning Research* 14(Aug): p. 2349–2353.
- Diamond, S., Landis, E., (2007). “Microstructural features of a mortar as seen by computed microtomography”. *Materials and Structures*. 40 (9), p. 989–993.
- Domingos, P. (2012). “A few useful things to know about machine learning”. *Communications of the ACM*, 55(10), p. 78-87.
- Duailibe, R. P.; Cavani, G. R.; Oliveira, M. C. B. (2005). “Influência do tipo de projeção da argamassa na resistência de aderência à tração e permeabilidade à água”. In: *Simpósio De Tecnologia Das Argamassas, 2005, Florianópolis. Anais ANTAC*, p. 508-517.

Duliu, O. (1999). "Computer axial tomography in geosciences: an overview". *Earth Science Reviews*, 48, p. 265-281.

Elaqra, H., Godin, N., Peix, G., R'Mili, M., & Fantozzi, G. (2007). "Damage evolution analysis in mortar, during compressive loading using acoustic emission and X-ray tomography: Effects of the sand/cement ratio". *Cement and Concrete Research*, 37(5), p. 703-713.

Falco, J.G. (2016). "Estatística aplicada". EdUFMT/UFPR, Cuiabá/Curitiba, Brasil.

Fernandes C. F.; Costa E. B. C.; Ara A. B; Campora F. L.; John V. M. (2009). "Influência da forma de aplicação da argamassa nas propriedades mecânicas dos revestimentos". in: VIII Simpósio De Tecnologia Das Argamassas, 2009, Curitiba. Anais ANTAC. p. 20

Ferreira, M. (2012). "Análise das características mecânicas de amostras de argamassas pré-doseadas". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Flores-Colen I., Brito J. (2015). "Renders." In: Gonçalves M., Margarido F. (eds) *Materials for Construction and Civil Engineering*. Springer, Cham.

Flores-Colen, I. (2009). "Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na ótica da manutenção preditiva". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Fontes, A. (2011). "Influência das condições de cura na carbonatação de argamassas tradicionais com ligantes à base de cal aérea – Métodos de análise". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST, Universidade de Lisboa. Portugal.

Gallucci, E., Scrivener, K., Groso, A., Stampanoni, M., & Margaritondo, G. (2007). "3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT)". *Cement and Concrete Research*, 37(3), p. 360-368.

Garcia, J. (2005). "Marcação CE obrigatória em Argamassas: uma garantia de Qualidade - Argamassas de Reboco", Lisboa, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, 23 p.

- Gladshiya, V. B., & Sharmila, K. (2021). "Analyzing the risk factors and predicting the learning ability of students during pandemic and comparing machine learning algorithms using orange tool". *Turkish Journal of Physiotherapy and Rehabilitation*, 32(3).
- Gomes, F. (2009). "Argamassas pré-doseadas para rebocos de edifícios antigos", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Gominho, M. (2016). "Caracterização Microestrutural de Argamassas". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST, Universidade de Lisboa. Portugal.
- Gouveia, J. P. M. (2021). "Análise ao comportamento de argamassas após aplicação nos suportes" Tese de mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2009). "Análise multivariada de dados". Bookman editora.
- Hanke, L., (2016). "Handbook of Analytical Methods for Materials", Materials Evaluation and Engineering, Inc.
- Hilton, A., & Armstrong, R.A. (2006). "Statnote 6: post-hoc ANOVA tests". *Microbiologist*, p. 34-36.
- Hoang, N. D., Chen, C. T., & Liao, K. W. (2017). "Prediction of chloride diffusion in cement mortar using multi-gene genetic programming and multivariate adaptive regression splines". *Measurement*, 112, p. 141-149.
- Hong, S., Liu, P., Zhang, J., Xing, F., & Dong, B. (2019). "Visual & quantitative identification of cracking in mortar subjected to loads using X-ray computed tomography method". *Cement and Concrete Composites*, 100, p. 15-24.
- Hsieh, J. (2003). "Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances", (Vol. 114). SPIE press.
- INE. (2011). "Buildings Tables - 2.03 - Buildings, according to construction period, by main materials used in construction." 2011 Census: XV general population census; V general housing census, National Institute of Statistics (INE), Lisbon.

- IPQ (2008). “Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta”. NP EN 1936, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- IPQ (2008a). “Métodos de ensaio de argamassas para Alvenaria, Parte 19: Determinação de permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas”. NP EN 1015-19, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- IPQ. (2006). Métodos de ensaio para pedra natural; Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). NP EN 14146.
- IPQ. (2017). NP EN 998-1. Especificações de argamassas para alvenarias–Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores.
- ISO (2002). “Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion”, ISO 15148, European Committee for Standardization, Brussels.
- ISO (2005). “Evaluation of pore size distribution and porosimetry of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 1: Mercury porosimetry”. 15901-1, International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO (2016). “Hygrothermal performance of building materials and products: determination of water vapor transmission properties”. EN ISO 12572, European Committee for Standardization, Brussels.
- Izbicki, R., & dos Santos, T. M. (2020). “Aprendizado de máquina: uma abordagem estatística”. Rafael Izbicki editora.
- Jain, P., Coogan, S. C., Subramanian, S. G., Crowley, M., Taylor, S., & Flannigan, M. D. (2020). “A review of machine learning applications in wildfire”. *Science and Management Environmental Reviews*, 28(4), p. 478-505.
- Jamovi project (2021). jamovi (Version 1.6) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>

Kak, A. C., & Slaney, M. (2001). "Principles of computerized tomographic imaging". Society for Industrial and Applied Mathematics.

Kazmierczak, C., Brezezinski, D. E., & Collatto, D. (2007). "Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa". Estudos Tecnológicos em Engenharia, 3(1), p. 47-58.

Ketcham, R. A., & Carlson, W. D. (2001). "Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences". Computers & Geosciences, 27(4), p. 381-400.

Koumoulos, E. P., Paraskevoudis, K., & Charitidis, C. A. (2019). « Constituents phase reconstruction through applied machine learning in nanoindentation mapping data of mortar surface". Journal of Composites Science, 3(3), p. 63.

Kupwade-Patil, K., Palkovic, S. D., Bumajdad, A., Soriano, C., & Büyükoztürk, O. (2018). "Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to Portland cement: Micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography". Construction and Building Materials, 158, p. 574-590.

Lacerda, E., Magalhães, A., Bernardes, E. E., Nunes, E. H. M., & Vasconcelos, W. L. (2017). "Acompanhamento do avanço da frente de carbonatação em compósito cimentício com sua estrutura de poros analisada por microtomografia computadorizada de raios-X (μ -CT)". Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 10(3), p. 653-668.

Landis, E. N., Keane, D. T. (2010). "X-ray microtomography". Materials characterization, 61(12), p. 1305-1316.

Lange, D. A., Deford, H. D., & Werner, A. M. (1999). "Microstructural investigation of mortar/unit interaction". J Masonry Soc, 17(1), p. 31-42.

Li, G., Stubblefield, M. A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., & Huang, B. (2004). "Development of waste tire modified concrete". Cement and Concrete Research, 34(12), p. 2283-2289.

LNEC (1968). “Recomendações para execução de revestimentos exteriores de argamassa”. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

LNEC (2002). “Revestimento de paredes, Absorção de água sob baixa pressão”. Ficha de ensaio FE Pa 39.1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 2002.

M. Heydarian, T. E. Doyle and R. Samavi, (2022). "MLCM: Multi-Label Confusion Matrix," in IEEE Access, vol. 10, p. 19083-19095.

Magalhães, A. (2002). “Pathology of old plasters”. Cadernos Edifícios, n.o 2, Lisboa: LNEC.

Magalhães, A., Costa, D., & Veiga, M. R. (2003). “Diagnóstico de anomalias de revestimentos de paredes com técnicas de ensaio in situ”. Avaliação da resistência mecânica. Encontro Sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, 3.

Margalha, M. G., Veiga, M. do R., & Brito, J. de. (2007). “Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea”. Associação Portuguesa Dos Fabricantes de Argamassa de Construção, 9.

Martins, A. (2008). "Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Martins, J.; Assunção, J. (2010). “Materiais de Construção - Argamassas e Rebocos”. Série Materiais, 3ª edição.

Matias G, Torres I, Bellei P, Flores-Colen I, Silveira D, Travincas R. (2021). “Influence of the substrate in the porosimetry of hardened mortars”. International Conference Construction, Energy, Environment e Sustainability. Coimbra, Portugal.

McDowell-Boyer, L. M., Hunt, J. R., & Sitar, N. (1986). “Particle transport through porous media”. Water resources research, 22(13), p. 1901-1921.

Mendes, M., & Akkartal, E. (2010). “Comparison of ANOVA F and WELCH tests with their respective permutation versions in terms of type I error rates and test power”. Kafkas Univ Vet Fak Derg, 16(5), p. 711-716.

- Mendes, M.P; Rodriguez-Galiano, V.; Luque-Espinar, J.; Chica-Olmo, M. (2018) – “Uso do Random Forest em modo Embedded e Wrapper Para a Seleção de Atributos Relacionados com a Poluição da Água Subterrânea por Nitratos”. 14 Congresso da água. Évora, Portugal.
- Mishra, M. (2020). “Machine learning techniques for structural health monitoring of heritage buildings: A state-of-the-art review and case studies”. *Journal of Cultural Heritage*, 47, p. 227-245.
- Mishra, M., Bhatia, A. S., & Maity, D. (2019). “Support vector machine for determining the compressive strength of brick-mortar masonry using NDT data fusion (case study: Kharagpur, India)”. *SN Applied Sciences*, 1(6), p. 1-11.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K. (2000). “Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures”. *Construction and Building Materials*, 14(1), p. 35-46.
- Morris, I. M., Kumar, V., & Glisic, B. (2020). “Predicting material properties of concrete from ground-penetrating radar attributes”. *Structural Health Monitoring*, 20(5), p. 2791-2812.
- Mounir, S., Maaloufa, Y., bakr Cherki, A., & Khabbazi, A. (2014). “Thermal properties of the composite material clay/granular cork”. *Construction and Building Materials*, 70, p. 183-190.
- Moura, C. (2007). “Aderência de Revestimentos Externos de Argamassa em Substratos de Concreto: influência das condições de temperatura e ventilação na cura do chapisco”. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- Muller, A. (2010). “Avaliação da aderência dos diferentes tipos de chapisco sobre substrato de concreto”, Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- Na, O., & Xi, Y. (2017). “Mechanical and durability properties of insulation mortar with rubber powder from waste tires”. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(2), p. 763-773.

- Nicot, P.M. (2008). "Interactions mortier-support: éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier". Tese (Doutoramento em Engenharia Civil) – Université de Toulouse, Toulouse, p. 224.
- Nunez, I., Marani, A., Flah, M., & Nehdi, M. L. (2021). "Estimating compressive strength of modern concrete mixtures using computational intelligence: A systematic review". *Construction and Building Materials*, 3(10), p. 125-279.
- Obrzut, L., Medeiros, A., & Luso, E. (2020). "Caracterização Experimental De Argamassas De Substituição À Base De Cal Submetidas Ao Envelhecimento Natural E Artificial". *Associação Brasileira de Patologias Das Construções*, 2226–2237.
- Oey, T., Jones, S., Bullard, J. W., & Sant, G. (2020). "Machine learning can predict setting behavior and strength evolution of hydrating cement systems". *Journal of the American Ceramic Society*, 103(1), p. 480-490.
- Palmer, L. A.; Parsons, D. A. (1934). "A study of the properties of mortars and bricks and their relation to bond". *Bureau of Standards Journal of Research*, v. 12, n. 5.
- Paulo, R. S. V. M. N. (2006). "Caracterização de argamassas industriais". Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Pei, Y., Agostini, F., & Skoczylas, F. (2017). "Rehydration on heat-treated cementitious materials up to 700° C-coupled transport properties characterization". *Construction and Building Materials*, 144, p. 650-662.
- Pereira, T. (2008). "Optimização das Características de Humedecimento e Secagem de Argamassas". Dissertação Para Obtenção de Grau de Académico de Mestre Em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Pipilikaki, P., & Beazi-Katsioti, M. (2009). "The assessment of porosity and pore size distribution of limestone Portland cement pastes ". *Construction and Building Materials*, 23(5), p. 1966-1970.

- Praneeth, S., Saavedra, L., Zeng, M., Dubey, B. K., & Sarmah, A. K. (2021). "Biochar admixed lightweight, porous and tougher cement mortars: Mechanical, durability and micro computed tomography analysis". *Science of The Total Environment*, 750, p. 142327.
- PROCEQ (2001) - "Porosity measurement according to the Karsten system", Porositester. <www.proceq.com>.
- Rato, V. (2006). "Influência da Estrutura Morfológica No Comportamento das Argamassas". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1 vol.
- Ray, S. (2019). "A quick review of machine learning algorithms". In 2019 International conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon) (pp. 35-39). IEEE.
- Recena, F.A.P. (2017). "Conhecendo argamassa". EDIPUCRS, Porto Alegre
- Reinhart, F. W. (1954). "Nature of adhesion". *Journal of Chemical Education*, 31(3), 128.
- Rodrigues, M. (2004). "Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas: Contribuição para o Estudo da Influência dos Ligantes". Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1 vol.
- Rodrigues, P., Henriques, F., & Rato, V. (2007). "Argamassas Correntes: Influência do Tipo de Ligante e do Agregado". 2o Congresso Nacional de Argamassas De Construção, Lisboa, Portugal.
- Ross, S. M. (2003). "Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data". *Journal of engineering technology*, 20(2), 38-41.
- Sadowski, Łukasz, Stefaniuk, Damian, (2017). "Microstructural evolution within the interphase between hardening overlay and existing concrete substrates". *Applied Science*. v. 7 (n. 2), 123.
- Saha, S. K., Pradhan, S., & Barai, S. V. (2020). "Use of machine learning based technique to X-ray microtomographic images of concrete for phase segmentation at meso-scale". *Construction and Building Materials*, 249, 118744

Scartezini, L. (2002). “Influência do tipo e preparo do substrato na aderência dos revestimentos de argamassa: estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da perda de água da argamassa fresca”. Dissertação de Mestrado Em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

Sequeira, C., Frade, D., Gonçalves, P., & Santos, A. S. (2012). “Análise de diferentes ligantes na formulação de argamassas industriais de reabilitação”. Associação Portuguesa Dos Fabricantes de Argamassa de Construção

Sevim, U. K., Bilgic, H. H., Cansiz, O. F., Ozturk, M., & Atis, C. D. (2021). “Compressive strength prediction models for cementitious composites with fly ash using machine learning techniques”. *Construction and Building Materials*, 271, 121584.

Shaikh, F. U. A., Supit, S. W. M., & Sarker, P. K. (2014). “A study on the effect of nano silica on compressive strength of high-volume fly ash mortars and concretes”. *Materials & Design*, 60, p. 433-442.

Silva, A.C.M., Santos, C., Rosal, P., Correa, R., Silva, A.J.C. (2017). “Análise em obra da resistência de aderência de revestimentos de argamassa preparadas com água e solução de cal sobre chapisco umedecido com água e solução de cal”. In: XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, São Paulo: GT Argamassas, agosto 2017.

Silva, C. O., & Nakakura, E. H. (2001). “A utilização de argamassa de revestimento em obras de pequeno porte–avaliação de estudo de caso de argamassa preparada em obra x argamassa industrializada”. *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, 549-565.

Silva. G. J. (2016). “Argamassa projetada X Argamassa Aplicada manualmente - custo, qualidade e tempo de execução”. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Brasília. Brasília.

Silveira D, Soares K, Torres I, Flores-Colen I, Travincas R. (2021). “Performance of Hydraulic lime mortars applied on a traditional substrate”. *International Conference Construction, Energy, Environment e Sustainability*. Coimbra, Portugal.

Silveira D, Torres I, Flores-Colen I, Travincas R, Matias G. (2019). “Interface Argamassa-Suporte: Análise das características físicas” – XIII SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Goiania, Brasil.

Silveira D, Torres I, Flores-Colen I, Travincas R. (2020). “Influence of lightweight concrete block support on physical and mechanical characteristics of applied mortars” – XV International Conference on Durability of Building Materials and Components. Barcelona, Spain.

Silveira, D., Gonçalves, A., Flores-Colen, I., Veiga, M. R., Torres, I., & Travincas, R. (2021). “Evaluation of in-service performance factors of renders based on in-situ testing techniques”. *Journal of Building Engineering*, 34, 101806.

Soares, K. M. P. (2021). “A influência dos suportes tradicionais no comportamento das argamassas de cal”. Tese de mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Sousa, A. J. C. D. (2010). “Aplicação de argamassas leves de reboco e assentamento em alvenarias”. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

Souza e Castro, P. A. (2012). “Tamanho de amostra e poder para três testes não-paramétricos”. Monografia (Bacharelado em estatística), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil.

Souza, L., & Pigozzo, T. A. J. (2018). “Estudo comparativo de produtividade e economia entre o serviço de revestimentos de paredes executados em argamassa industrializada projetada e argamassa convencional”. Monografia Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Paranaense, Toledo, Paraná, Brasil.

Sugiyama, T., Promentilla, M. A. B., Hitomi, T., Takeda, N. (2010). “Application of synchrotron microtomography for pore structure characterization of deteriorated cementitious materials due to leaching”. *Cement and Concrete Research*, 40(8), 1265-1270.

Sultangaliyeva, F., Carré, H., La Borderie, C., Zuo, W., Keita, E., & Roussel, N. (2020). “Influence of flexible fibers on the yield stress of fresh cement pastes and mortars”. *Cement and Concrete Research*, 138, 106221.

Sun, H., Burton, H. V., & Huang, H. (2021). “Machine learning applications for building structural design and performance assessment: State-of-the-art review”. *Journal of Building Engineering*, 33, 101816.

Takahashi, H., Sugiyama, T. (2019). “Application of non-destructive integrated CT-XRD method to investigate alteration of cementitious materials subjected to high temperature and pure water”. *Construction and Building Materials*, 203, 579-588.

Tan, K. H., & Du, H. (2013). “Use of waste glass as sand in mortar: Part I–Fresh, mechanical and durability properties”. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), p. 109-117.

Teixeira, P.M. (2017). “Catálogo de técnicas laboratoriais de diagnóstico em amostras recolhidas de edificações em serviço”. Tese de Mestrado, IST, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

Thai, H. T. (2022). “Machine learning for structural engineering: A state-of-the-art review”. *Structures*, 38, p. 448-491.

Thomas, C., De Brito, J., Gil, V., Sainz-Aja, J. A., & Cimentada, A. (2018). “Multiple recycled aggregate properties analysed by X-ray microtomography”. *Construction and Building Materials*, 166, 171-180.

Torres I, Silveira D, Flores-Colen I, Pinto R, Matias G. (2019). “Influence of the substrate on the mechanical characteristics of the applied mortars” – 5th Historic Mortars Conference. Pamplona, Spain.

Torres I, Travincas R, Flores-Colen I, Bellei P. (2021). “The influence of ceramic brick support on water resistance in applied industrial mortar”. *International Conference Construction, Energy, Environment e Sustainability*. Coimbra, Portugal.

- Torres, I. (2014). “Influência da absorção do suporte na argamassa de revestimento”. Relatório de Pós-doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Torres, I., Flores-Colen, I., Braz, J., & Bellei, P. (2021). “Análise do comportamento de argamassas de cal aérea aplicadas em suportes de tijolo maciço e pedra calcária. Congresso da Reabilitação - CONREA, Aveiro, Portugal. junho 2021.
- Torres, I., Veiga, R., & Freitas, V. (2018). “Influence of substrate characteristics on behavior of applied mortar”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018254.
- Torres, M. I. M., Flores-Colen, I., Silveira, D. S. G. D., Pinto, R. T., & Matias, G. M. L. (2020). “Interface argamassa-suporte: análise das características físicas com base em várias campanhas experimentais”. *Ambiente Construído*, 20, 331-342.
- Tozzi, A. R.; Curi, C. E.; Gallego, R. F. T. (2009). “Sistemas Construtivos Nos Empreendimentos Imobiliários”. Curitiba: IESDE BRASIL AS.
- Tran, T. H., & Hoang, N. D. (2017). “Estimation of algal colonization growth on mortar surface using a hybridization of machine learning and metaheuristic optimization”. *Sādhanā*, 42(6), 929-939.
- Travincas R, Silveira D, Flores-Colen I, Torres I, Matias G. (2020) – “A influência do suporte em tijolo cerâmico na resistência à água das argamassas aplicadas”. V Congresso Internacional na Recuperação, Manutenção e Restauração de Edifícios. Rio de Janeiro, Brasil.
- Travincas, R., Bellei, P., Torres, I., Flores-Colen, I., Matias, G., & Silveira, D. (2022). “The Use of Fibreglass Mesh in the Experimental Characterisation of Applied Coating Mortars”. *Coatings*, 12(8), 1091.
- Travincas, R., Pereira, M., Flores-Colen, I., Maurício, M., Torres, I. (2020). “Estudo da interface suporte-argamassa por meio de técnicas avançadas de caracterização”. *Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management (Rehabend)*. Granada, Espanha.

- Travincas, R., Pereira, M. F., Torres, I., Maurício, A., Silveira, D., & Flores-Colen, I. (2022a). "X-ray Microtomography applied to mortars: Review of microstructural visualization and parameterization". *Micron*, 103375.
- Tuna, J.; Feiteira, J.; Flores-Colen, I.; Pereira, M.F., Brito, J.de. (2015)." In situ characterization of damaging soluble salts in walls construction materials". *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(5).
- Veiga, M. R., (2009). "Patologia das Argamassas de Alvenaria". 3o Encontro Nacional sobre Reabilitação e Patologia de Edifícios, FEUP, Porto, 2009
- Veiga, R. (1998). "Comportamento de argamassas de revestimento de paredes – Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação". Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Teses e programas de investigação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil Lisboa.
- Veiga, R., & Faria, P. (1990). "Revestimentos de Ligantes Minerais e Mistos com Base em Cimento, Cal e Resina Sintética". Curso de Especialização sobre Revestimentos de Paredes – 1ºMódulo. LNEC, p.40-173.
- Velosa, A. (2006). "Argamassas de Cal com Pozolanas para Revestimentos de Paredes Antigas". Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 1 vol.
- Vicente, M., Mínguez, J., & González, D. (2017). "The use of computed tomography to explore the microstructure of materials in civil engineering: from rocks to concrete" *Computed Tomography-advanced applications*, p.207-230.
- Wu, L., Hu, C., & Liu, W. V. (2020). "Forecasting the deterioration of cement-based mixtures under sulfuric acid attack using support vector regression based on Bayesian optimization". *SN Applied Sciences*, 2(12), p. 1-16.
- Wu, S. – "Polymer interface and adhesion", New York: M. Dekker, 1982
- Xu, K., Tremsin, A. S., Li, J., Ushizima, D. M., Davy, C. A., Bouterf, A., ... & Monteiro, P. J. (2021). "Microstructure and water absorption of ancient concrete from Pompeii: An integrated

synchrotron microtomography and neutron radiography characterization”. *Cement and Concrete Research*, 139, 106282.

Xu, Y., Zhou, Y., Sekula, P., & Ding, L. (2021). “Machine learning in construction: From shallow to deep learning”. *Developments in the built environment*, 6, 100045.

Yao, W., Liu, H. W., Xu, Y., Xia, K., & Zhu, J. (2017). “Thermal degradation of dynamic compressive strength for two mortars”. *Construction and Building Materials*, 136, 139-152.

Yao, W., Xia, K., & Liu, H. W. (2018). “Influence of heating on the dynamic tensile strength of two mortars: Experiments and models. International”. *Journal of Impact Engineering*, 122, p. 407-418.

Yao, W., Xu, Y., Liu, H. W., & Xia, K. (2017). “Quantification of thermally induced damage and its effect on dynamic fracture toughness of two mortars”. *Engineering Fracture Mechanics*, 169, p. 74-88.

Zaiontz, C. (2020). “Real Statistics Using Excel”. www.real-statistics.com - The data analysis for this paper was generated using the Real Statistics Resource Pack software (Release 8.1.5). Copyright (2013 – 2021) Charles Zaiontz. <https://www.real-statistics.com/>

Zhou, B., Zhang, M., Wang, L., & Ma, G. (2021). “Experimental study on mechanical property and microstructure of cement mortar reinforced with elaborately recycled GFRP fiber”. *Cement and Concrete Composites*, 117, 103908.

Zhou, M., Liao, J., An, L., Deng, W., Hassanein, M. F., & Yu, Z. (2018). “Analysis of stress-induced cracks in concrete and mortar under cyclic uniaxial compression”. *Construction and Building Materials*, 187, 652-664.

ANEXOS

Anexo A – Resultados individuais dos ensaios (28 dias de cura)

Anexo B – Resultados individuais dos ensaios (envelhecimento acelerado)

Anexo C – Resultados individuais dos ensaios (cura no exterior – 300 dias)

Anexo D – Base de dados utilizada no desenvolvimento dos algoritmos de aprendizagem de máquina

Anexos

Anexo A. Resultados individuais dos ensaios (28 dias de cura)

Massa volúmica aparente (kg/m ³)					
MC / MP	TF	TM	PB	BB	BBL
1366,12	1558,57	1563,96	1534,07	1528,00	1460,40
1370,79	1577,67	1555,09	1577,90	1547,72	1501,46
1362,41	1571,76	1554,31	1549,96	1573,83	1473,98
1364,09	1570,98	1574,28	1499,25	1590,01	1495,11
1371,10	1575,85	1558,49	1534,86	1509,26	1500,99
1368,53	1582,39	1565,92	1500,32	1590,23	1450,70
1372,22	1606,41	1568,18	1509,32	1565,39	1460,23
1378,34	1577,20	1580,10	1520,23	1574,25	1492,67
1365,17	1571,03	1570,28	1529,97	1543,88	1482,31
1366,07	1563,90	1588,79	1513,96	1537,32	1460,69
1359,16	1564,25	1567,75	1518,94	1529,08	1460,28
1368,95	1589,15	1533,70	1513,69	1527,10	1492,75
1377,31	1591,54	1564,48	1529,48	1519,86	1518,01
1351,53	1573,54	1571,64	1544,48	1536,61	1482,80
1366,90	1579,92	1546,57	1530,15	1528,40	1480,96
1363,85	1583,26	1564,88	1565,18	1539,15	1489,40
1349,15	1595,88	1569,10	1521,13	1520,00	1476,67
1363,55	1571,29	1561,68	1520,65	1528,07	1441,39
1364,24	1563,92	1563,01	1531,08	1556,80	1461,47
1357,14	1709,25	1562,86	1534,73	1529,06	1456,10
1366,01	1579,45	1567,20	1513,36	1552,15	1467,96
1371,26	1586,45	1621,92	1529,84	1511,25	1445,12
1354,18	1594,29	1606,93	1510,66	1511,99	1475,65
1372,04	1553,29	1579,23	1516,96	1535,19	1503,99
	1571,03	1503,21	1525,33	1523,06	1456,78
	1563,81	1577,90	1542,89	1530,75	1478,42
	1591,70	1550,43	1537,46	1496,92	1473,42
	1560,28	1564,11	1580,70	1517,18	1453,24
	1553,30	1522,64	1545,16	1550,67	1464,11
	1555,64	1577,76	1547,95	1534,45	1461,65
	1551,97	1570,11	1536,59	1511,51	1472,11
	1574,07	1592,18	1549,56	1555,88	1468,91
	1598,36	1571,08	1566,56	1528,42	1492,65
	1582,56	1586,08	1511,74	1526,68	1486,95
	1555,65	1577,90	1518,75	1540,96	1469,52
	1560,78	1573,26	1502,68	1543,67	1491,35
	1562,87	1580,76	1550,55	1578,66	1454,77
	1572,84	1588,61	1513,48	1514,29	1492,40

Massa volúmica aparente (kg/m ³) - Continuação					
MC / MP	TF	TM	PB	BB	BBL
	1558,97	1569,17	1520,05	1535,72	1468,36
	1575,59	1569,25	1521,17	1566,27	1460,06
	1588,15	1577,25	1540,71	1555,73	1510,92
	1586,46	1575,50		1574,51	1467,15

Porosidade aberta (%)					
MC / MP	TF	TM	PB	BB	BBL
29,29	22,23	21,79	23,62	27,88	30,37
27,57	21,97	22,11	24,78	26,90	29,57
27,73	21,58	21,94	24,64	23,48	30,35
27,98	21,87	21,09	27,18	25,40	30,25
27,67	22,02	22,49	25,06	27,24	29,78
28,36	21,91	22,62	26,35	25,90	30,70
27,70	20,37	21,57	26,42	23,91	30,02
28,31	21,38	22,64	26,13	24,67	29,37
28,11	21,90	22,22	28,36	23,60	29,49
28,60	21,28	23,48	26,82	23,36	30,87
28,45	21,95	22,60	25,34	25,01	30,23
28,18	21,49	23,20	26,02	24,85	29,39
28,10	23,49	21,56	26,43	27,91	28,46
28,37	22,44	23,34	26,04	24,18	29,38
28,61	20,14	21,42	25,77	25,84	29,45
33,22	22,02	22,70	25,26	24,27	30,29
29,14	22,00	21,88	26,36	25,41	30,65
28,29	20,85	22,74	25,03	24,32	32,11
27,69	22,95	21,40	26,30	23,35	30,43
27,23	23,13	23,10	24,89	24,91	31,39
28,11	21,96	22,10	26,16	24,29	31,31
27,90	21,70	23,15	29,87	26,66	30,54
29,04	23,99	22,21	26,18	26,52	29,68
29,31	22,98	22,22	25,43	24,49	29,47
	21,59	22,01	26,82	25,81	29,88
	21,11	22,69	27,67	24,06	30,14
	22,19	23,10	26,00	27,16	29,78
	22,47	22,85	24,41	25,34	31,44
	22,57	27,95	26,06	25,77	30,52
	22,72	22,33	24,01	29,54	31,46
	24,02	22,27	24,90	27,16	30,94
	21,76	22,07	25,22	25,03	31,13
	23,33	22,25	24,29	26,29	30,77
	23,30	22,34	26,15	26,64	30,10

Porosidade aberta (%) - Continuação					
MC / MP	TF	TM	PB	BB	BBL
	23,03	23,10	25,96	25,65	30,01
	21,18	22,80	27,91	24,74	30,24
	21,63	22,37	24,66	24,11	31,10
	22,95	23,35	26,38	26,82	30,18
	22,43	22,95	25,28	24,48	30,36
	22,77	23,05	25,85	24,03	29,83
	21,39	23,09	25,72	24,44	28,26
	21,39	23,14		24,12	30,22

Absorção por capilaridade (kg/(m ² .s ^{0,5}))						
MP	MC	TF	TM	PB	BB	BBL
0,013	0,205	0,174	0,219	0,139	0,154	0,268
0,016	0,130	0,173	0,230	0,161	0,149	0,329
0,014	0,208	0,163	0,212	0,158	0,157	0,280
0,014	0,209	0,144	0,235	0,173	0,143	0,283
0,011	0,206	0,091	0,217	0,141	0,183	0,282
	0,205	0,133	0,290	0,155	0,183	0,303
	0,173	0,174	0,250	0,167	0,133	0,317
	0,225	0,159	0,222	0,158	0,160	0,274
	0,207	0,170	0,240	0,144	0,121	0,276
	0,248	0,172	0,248	0,133	0,133	0,279
	0,215	0,170	0,250	0,159	0,163	0,278
	0,194	0,194	0,296	0,182	0,157	0,328
	0,111	0,182	0,245	0,187	0,217	0,349
	0,215	0,241	0,258	0,163	0,162	0,316
	0,217	0,193	0,271	0,151	0,226	0,319
	0,191	0,193	0,226	0,166	0,147	0,320
	0,250	0,173	0,262	0,152	0,154	0,316
	0,221	0,140	0,227	0,178	0,134	0,287
	0,230	0,182	0,235	0,158	0,158	0,264
	0,214	0,178	0,282	0,139	0,143	0,344
	0,237	0,227	0,234	0,154	0,150	0,339
	0,213	0,212	0,294	0,150	0,179	0,277
	0,238	0,200	0,299	0,162	0,226	0,311
	0,268	0,183	0,309	0,157	0,161	0,327
		0,213	0,284	0,170	0,206	0,296
		0,177	0,301	0,181	0,207	0,310
		0,187	0,276	0,186	0,184	0,328
		0,193	0,315	0,145	0,199	0,291
		0,168	0,300	0,161	0,152	0,290
		0,198	0,302	0,157	0,179	0,296

Absorção por capilaridade (kg/(m ² .s ^{0,5})) - Continuação						
MP	MC	TF	TM	PB	BB	BBL
		0,213	0,285	0,139	0,223	0,304
		0,211	0,283	0,181	0,176	0,336
		0,211	0,296	0,183	0,219	0,306
		0,212	0,291	0,166	0,232	0,315
		0,183	0,283	0,197	0,203	0,287
		0,142	0,273	0,162	0,181	0,337
		0,180	0,255	0,144	0,188	0,301
		0,187	0,307	0,158	0,240	0,395
		0,182	0,291	0,163	0,162	0,324
		0,181	0,219	0,163	0,175	0,284
		0,152	0,200	0,164	0,139	0,327
		0,192	0,214	0,164	0,133	0,296

Índice de secagem						
MP	MC	TF	TM	PB	BB	BBL
0,148	0,118	0,112	0,131	0,116	0,150	0,105
0,171	0,121	0,128	0,160	0,135	0,147	0,116
0,177	0,124	0,121	0,129	0,151	0,135	0,108
0,181	0,137	0,130	0,125	0,156	0,139	0,120
0,142	0,137	0,138	0,112	0,155	0,141	0,116
	0,137	0,137	0,116	0,153	0,141	0,132
	0,138	0,119	0,122	0,129	0,153	0,121
	0,138	0,138	0,135	0,126	0,162	0,116
	0,139	0,129	0,130	0,136	0,154	0,121
	0,139	0,132	0,164	0,133	0,158	0,111
	0,140	0,122	0,130	0,141	0,160	0,122
	0,140	0,123	0,131	0,125	0,140	0,133
	0,141	0,129	0,135	0,140	0,136	0,130
	0,142	0,131	0,132	0,127	0,133	0,120
	0,143	0,136	0,116	0,135	0,153	0,110
	0,144	0,157	0,122	0,134	0,134	0,128
	0,144	0,140	0,124	0,142	0,139	0,104
	0,148	0,132	0,126	0,142	0,149	0,121
	0,148	0,152	0,148	0,130	0,147	0,129
	0,150	0,132	0,113	0,157	0,131	0,130
	0,153	0,137	0,137	0,160	0,161	0,120
	0,154	0,123	0,124	0,158	0,175	0,118
	0,155	0,136	0,132	0,137	0,166	0,107
	0,173	0,150	0,119	0,134	0,157	0,104
		0,160	0,124	0,129	0,156	0,117
		0,147	0,123	0,118	0,165	0,118

Índice de secagem - Continuação						
MP	MC	TF	TM	PB	BB	BBL
		0,144	0,120	0,132	0,147	0,118
		0,159	0,119	0,134	0,164	0,124
		0,130	0,122	0,127	0,154	0,117
		0,141	0,124	0,138	0,152	0,117
		0,139	0,119	0,143	0,189	0,131
		0,136	0,118	0,132	0,170	0,119
		0,139	0,116	0,127	0,183	0,110
		0,142	0,124	0,115	0,166	0,116
		0,154	0,121	0,124	0,162	0,111
		0,144	0,111	0,123	0,151	0,106
		0,139	0,104	0,122	0,160	0,115
		0,143	0,119	0,123	0,171	0,114
		0,136	0,120	0,133	0,148	0,114
		0,158	0,108	0,139	0,155	0,111
		0,153	0,132	0,120	0,173	0,110
		0,156	0,120		0,178	0,121

Permeabilidade ao vapor de água δ (kg/(m.s.Pa))					
MC / MP	TF	TM	PB	BB	BBL
1,76E-11	2,25E-11	2,08E-11	2,25E-11	2,23E-11	2,28E-11
1,81E-11	2,12E-11	2,08E-11	2,23E-11	2,25E-11	2,40E-11
1,87E-11	2,19E-11	2,01E-11	2,29E-11	2,33E-11	2,42E-11
2,01E-11	2,05E-11	2,13E-11	2,35E-11	2,31E-11	2,44E-11
2,18E-11	2,05E-11	2,07E-11	2,24E-11	2,39E-11	2,32E-11

Resistência à compressão (MPa)						
MP	MC	TF	TM	PB	BB	BBL
3,29	2,19	3,87	6,35	3,72	3,80	4,94
3,29	2,35	4,14	5,92	4,01	3,59	4,53
3,53	2,40	3,79	7,29	4,14	4,13	3,88
3,52	2,40	5,08	6,92	3,14	4,07	4,01
3,09	2,43	4,46	6,72	3,95	4,27	3,68
3,09	2,46	5,18	6,71	4,93	3,31	3,95
3,06	2,47	5,58	5,12	3,88	3,12	4,40
2,99	2,48	5,24	5,76	2,96	3,87	3,85
2,93	2,49	4,70	6,66	3,87	3,98	3,71
3,45	2,54	4,97	6,57	4,00	4,28	3,98
3,40	2,55	4,70	4,32	4,67	3,59	4,08
3,36	2,57	4,91	7,03	3,58	4,40	3,80

Resistência à compressão (MPa) - Continuação						
MP	MC	TF	TM	PB	BB	BBL
2,95	2,59	4,59	6,35	3,90	3,90	4,23
3,87	2,59	5,56	6,01	4,17	3,50	4,49
3,22	2,61	5,13	6,44	3,82	3,74	3,76
3,24	2,61	5,45	6,77	3,60	3,42	3,75
	2,61	4,93	6,44	4,45	3,94	3,74
	2,62	6,20	6,19	4,16	4,04	4,00
	2,63	5,63	6,26	3,13	3,91	4,42
	2,67	2,82	6,65	4,11	4,57	3,99
	2,68	4,24	6,39	4,41	4,14	4,18
	2,71	5,03	6,21	4,21	4,70	4,74
	2,73	4,09	7,42	3,93	4,43	4,10
	2,80	3,50	5,09	4,23	4,08	4,11
		5,08	7,13	4,24	3,21	3,22
		5,53	6,38	4,39	4,94	4,59
		4,76	3,87	2,99	3,77	4,34
		6,14	5,93	4,60	4,49	3,45
		5,35	6,00	4,34	3,80	3,42
		5,03	4,64	4,56	4,73	4,39
		3,58	6,61	4,24	4,09	3,69
		4,03	6,72	4,22	3,54	3,70
		4,87	6,05	3,09	3,84	4,10
		4,79	5,80	5,75	3,41	4,48
		4,50	6,22	4,51	4,36	3,64
		5,68	6,34	4,09	4,32	4,31
		5,33	5,35	3,06	3,34	3,78
		5,32	4,92	3,20	4,12	3,71
		6,46	5,22	4,17	4,06	3,77
		5,99	6,18	3,95	3,66	3,81
		4,69	7,51	3,90	4,74	2,93
		5,26	6,49	3,15	3,62	3,71

Resistência à tração por flexão (MPa)	
MP	
1,41	
1,62	
1,15	
1,09	

Anexo B. Resultados individuais dos ensaios (Envelhecimento acelerado)

Massa volúmica aparente (kg/m ³)				
TF	TM	PB	BB	BBL
1590,04	1652,01	1542,30	1549,63	1574,87
1596,14	1678,35	1576,25	1544,79	1617,61
1621,72	1688,04	1603,63	1577,16	1620,36
1613,75	1686,64	1545,01	1518,86	1581,25
1618,37	1675,27	1552,83	1544,15	1628,06
1622,33	1625,26	1586,67	1559,18	1567,01
1636,61	1678,98	1547,52	1552,17	1577,32
1587,71	1647,96	1557,19	1549,71	1578,39
1619,20	1673,32	1582,81	1559,66	1594,14
1595,42	1629,95	1552,17	1571,74	1585,24

Porosidade aberta (%)				
TF	TM	PB	BB	BBL
20,35	25,40	28,31	26,71	25,95
21,34	25,60	25,85	28,03	26,10
21,48	25,30	26,24	28,70	25,63
20,42	25,57	27,40	27,82	27,59
21,60	25,58	27,62	27,10	25,75
20,80	25,44	26,70	28,02	25,75
20,98	25,08	27,41	27,66	27,25
21,37	25,51	26,48	26,86	26,92
21,13	25,51	25,62	25,94	26,47
21,91	26,36	27,72	28,22	27,27

Absorção por capilaridade (kg/(m ² .s ^{0.5}))				
TF	TM	PB	BB	BBL
0,281	0,171	0,215	0,231	0,275
0,289	0,180	0,268	0,243	0,241
0,290	0,154	0,220	0,208	0,317
0,271	0,200	0,202	0,260	0,287
0,295	0,140	0,238	0,232	0,237
0,285	0,180	0,279	0,220	0,322
0,274	0,157	0,305	0,283	0,249
0,321	0,132	0,316	0,270	0,210
0,331	0,153	0,235	0,264	0,258
0,324	0,168	0,331	0,187	0,245

Índice de secagem				
TF	TM	PB	BB	BBL
0,158	0,104	0,122	0,119	0,130
0,158	0,125	0,118	0,129	0,121
0,169	0,123	0,109	0,124	0,120
0,168	0,120	0,119	0,115	0,116
0,164	0,103	0,110	0,109	0,109
0,162	0,097	0,108	0,110	0,118
0,158	0,120	0,121	0,118	0,110
0,142	0,111	0,106	0,113	0,117
0,148	0,101	0,105	0,107	0,111
0,138	0,102	0,113	0,113	0,122

Permeabilidade ao vapor de água δ (kg/(m.s.Pa))				
TF	TM	PB	BB	BBL
2,179E-11	2,025E-11	2,195E-11	2,146E-11	2,011E-11
1,938E-11	2,193E-11	1,627E-11	2,336E-11	2,303E-11
1,953E-11	2,183E-11	1,739E-11	2,100E-11	2,176E-11
2,320E-11	2,198E-11	2,124E-11	2,374E-11	2,125E-11
1,928E-11	2,182E-11	2,157E-11	2,168E-11	2,062E-11
2,231E-11				
2,076E-11				
2,290E-11				

Resistência à compressão (MPa)				
TF	TM	PB	BB	BBL
5,21	5,33	4,00	3,31	3,50
5,98	6,05	4,04	3,87	3,52
4,40	5,68	4,01	3,69	3,43
4,75	5,04	3,15	3,75	2,61
5,18	5,47	3,97	3,76	3,09
5,13	5,81	3,50	3,85	2,94
6,12	6,34	3,46	3,87	3,72
6,26	7,06	3,45	3,43	3,34
4,28	5,99	4,11	3,97	2,65
4,31		3,18	3,68	3,66

Anexo C. Resultados individuais dos ensaios (Cura – 300 dias)

Massa volúmica aparente (kg/m ³)				
TF	TM	PB	BB	BBL
1517,09	1544,01	1495,15	1511,38	1519,80
1544,54	1550,25	1480,38	1479,60	1493,19
1560,00	1554,39	1586,86	1504,29	1511,57
1608,58	1606,37	1487,64	1529,64	1541,84
1531,71	1540,41	1553,73	1488,75	1513,83
1531,36	1545,06	1473,01	1505,06	1488,16
1604,03	1580,92	1487,23	1494,59	1504,98
1539,25	1551,88	1575,85	1488,75	1511,54
1606,52	1540,72	1482,57	1499,85	1491,47
1538,76	1605,58	1469,51	1503,65	1517,46

Porosidade aberta (%)				
TF	TM	PB	BB	BBL
33,43	31,33	32,53	32,67	33,03
33,14	30,37	32,92	32,63	32,87
31,85	30,69	31,21	33,11	32,97
30,88	31,09	32,91	32,23	34,23
33,19	30,95	31,32	32,61	33,26
32,54	31,22	33,36	32,28	33,54
30,71	31,86	33,18	31,89	32,29
31,76	30,16	31,22	32,64	32,63
30,49	30,62	32,80	32,05	33,23
32,29	30,97	33,58	32,59	34,17

Absorção por capilaridade (kg/(m ² .s ^{0.5}))				
TF	TM	PB	BB	BBL
0,282	0,280	0,340	0,294	0,358
0,255	0,319	0,367	0,314	0,368
0,260	0,269	0,355	0,309	0,291
0,270	0,311	0,332	0,330	0,335
0,267	0,241	0,365	0,325	0,360
0,276	0,269	0,359	0,307	0,347
0,259	0,258	0,304	0,299	0,351
0,284	0,258	0,322	0,294	0,362
0,261	0,260	0,357	0,332	0,311
0,279	0,247	0,331	0,296	0,333

Índice de secagem				
TF	TM	PB	BB	BBL
0,141	0,135	0,145	0,136	0,135
0,130	0,119	0,137	0,138	0,141
0,136	0,119	0,133	0,137	0,124
0,133	0,107	0,132	0,130	0,116
0,152	0,108	0,141	0,135	0,137
0,148	0,121	0,127	0,120	0,128
0,161	0,127	0,132	0,126	0,139
0,145	0,131	0,124	0,147	0,136
0,148	0,128	0,141	0,158	0,137
0,145	0,141	0,148	0,149	0,150

Permeabilidade ao vapor de água δ (kg/(m.s.Pa))				
TF	TM	PB	BB	BBL
2,864E-11	2,543E-11	2,725E-11	2,792E-11	2,848E-11
2,643E-11	2,250E-11	2,797E-11	2,678E-11	2,784E-11
2,709E-11	2,500E-11		2,607E-11	2,724E-11
2,637E-11	2,382E-11		2,711E-11	2,660E-11
2,622E-11	2,260E-11		2,668E-11	2,708E-11

Resistência à compressão (MPa)				
TF	TM	PB	BB	BBL
4,33	5,45	2,68	3,79	2,83
4,53	4,73	2,65	4,08	2,60
4,45	4,63	4,11	3,49	2,95
4,23	4,29	2,78	3,53	2,14
4,46	4,10	4,08	4,21	2,70
4,46	4,65		3,42	2,87
4,42	4,33		3,73	3,15
3,88			3,97	3,02
3,86			2,93	3,01
4,32			3,75	

Anexo D. Base de dados utilizada no desenvolvimento dos algoritmos de aprendizagem de máquina

DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
0,000	-	0,000	0,000	29,291	1366,123	0,205	2,850	0,137
0,000	-	0,000	0,000	27,573	1370,793	0,130	2,189	0,148
0,000	-	0,000	0,000	27,733	1362,406	0,208	2,681	0,137
0,000	-	0,000	0,000	27,982	1364,089	0,209	2,481	0,140
0,000	-	0,000	0,000	27,669	1371,104	0,206	2,968	0,141
0,000	-	0,000	0,000	28,358	1368,530	0,205	2,897	0,137
0,000	-	0,000	0,000	27,699	1372,216	0,173	2,801	0,139
0,000	-	0,000	0,000	28,310	1378,342	0,225	2,472	0,124
0,000	-	0,000	0,000	28,106	1365,168	0,207	2,614	0,140
0,000	-	0,000	0,000	28,597	1366,069	0,248	2,729	0,143
0,000	-	0,000	0,000	28,452	1359,157	0,215	2,609	0,142
0,000	-	0,000	0,000	28,180	1368,948	0,194	2,902	0,148
0,000	-	0,000	0,000	28,103	1377,315	0,111	2,425	0,173
0,000	-	0,000	0,000	28,368	1351,527	0,215	2,897	0,153
0,000	-	0,000	0,000	28,607	1366,903	0,217	2,667	0,138
0,000	-	0,000	0,000	33,220	1363,847	0,191	2,588	0,118
0,000	-	0,000	0,000	29,137	1349,148	0,250	2,818	0,139
0,000	-	0,000	0,000	28,286	1363,553	0,221	2,399	0,121
0,000	-	0,000	0,000	27,688	1364,244	0,230	2,706	0,154
0,000	-	0,000	0,000	27,233	1357,139	0,214	2,589	0,144
0,000	-	0,000	0,000	28,108	1366,009	0,237	2,607	0,155
0,000	-	0,000	0,000	27,897	1371,263	0,213	2,630	0,150
0,000	-	0,000	0,000	29,036	1354,184	0,238	2,546	0,144
0,000	-	0,000	0,000	29,309	1372,043	0,268	2,494	0,138
0,000	-	0,000	0,000	29,261	1408,388	0,221	2,618	0,142
0,000	-	0,000	0,000	26,273	1429,162	0,278	2,350	0,142
0,000	-	0,000	0,000	26,149	1418,506	0,184	2,575	0,142
0,000	-	0,000	0,000	25,310	1442,590	0,299	2,545	0,142
0,000	-	0,000	0,000	26,352	1412,123	0,324	2,400	0,142
0,000	-	0,000	0,000	25,251	1463,554	0,285	2,457	0,142
0,000	-	0,000	0,000	28,765	1427,997	0,319	2,617	0,142
0,000	-	0,000	0,000	26,728	1443,767	0,145	2,617	0,142
0,000	-	0,000	0,000	23,344	1362,640	0,119	2,617	0,142

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
0,000	-	0,000	0,000	22,855	1379,757	0,119	2,617	0,142
0,000	-	0,000	0,000	23,461	1389,826	0,088	2,617	0,142
0,000	-	0,000	0,000	23,213	1367,606	0,118	2,617	0,142
0,000	-	0,000	0,000	22,792	1381,354	0,041	2,617	0,142
0,000	-	0,000	0,000	23,040	1369,537	0,065	2,617	0,142
0,000	-	0,000	0,000	22,100	1413,862	0,095	2,617	0,142
0,000	-	0,000	0,000	23,467	1399,546	0,198	2,617	0,142
0,329	22,239	0,023	11,460	23,620	1534,070	0,139	3,718	0,116
0,329	22,239	0,023	11,460	24,780	1577,905	0,161	4,007	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	24,640	1549,964	0,158	4,144	0,151
0,329	22,239	0,023	11,460	27,181	1499,253	0,173	3,139	0,156
0,329	22,239	0,023	11,460	25,064	1534,864	0,141	3,951	0,155
0,329	22,239	0,023	11,460	26,345	1500,321	0,155	4,930	0,153
0,329	22,239	0,023	11,460	26,423	1509,323	0,167	3,877	0,129
0,329	22,239	0,023	11,460	26,125	1520,226	0,158	2,956	0,126
0,329	22,239	0,023	11,460	28,359	1529,971	0,144	3,866	0,136
0,329	22,239	0,023	11,460	26,820	1513,956	0,133	4,003	0,133
0,329	22,239	0,023	11,460	25,340	1518,939	0,159	4,667	0,141
0,329	22,239	0,023	11,460	26,023	1513,695	0,182	3,575	0,125
0,329	22,239	0,023	11,460	26,431	1529,477	0,187	3,900	0,140
0,329	22,239	0,023	11,460	26,038	1544,484	0,163	4,173	0,127
0,329	22,239	0,023	11,460	25,768	1530,149	0,151	3,817	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	25,261	1565,179	0,166	3,596	0,134
0,329	22,239	0,023	11,460	26,364	1521,133	0,152	4,449	0,142
0,329	22,239	0,023	11,460	25,029	1520,646	0,178	4,164	0,142
0,329	22,239	0,023	11,460	26,298	1531,077	0,158	3,132	0,130
0,329	22,239	0,023	11,460	24,893	1534,727	0,139	4,105	0,157
0,329	22,239	0,023	11,460	26,164	1513,359	0,154	4,407	0,160
0,329	22,239	0,023	11,460	29,867	1529,840	0,150	4,210	0,158
0,329	22,239	0,023	11,460	26,183	1510,657	0,162	3,928	0,137
0,329	22,239	0,023	11,460	25,426	1516,959	0,157	4,232	0,134
0,329	22,239	0,023	11,460	26,819	1525,333	0,170	4,235	0,129
0,329	22,239	0,023	11,460	27,670	1542,887	0,181	4,392	0,118
0,329	22,239	0,023	11,460	25,997	1537,463	0,186	2,986	0,132

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
0,329	22,239	0,023	11,460	24,408	1580,703	0,145	4,597	0,134
0,329	22,239	0,023	11,460	26,064	1545,157	0,161	4,345	0,127
0,329	22,239	0,023	11,460	24,012	1547,953	0,157	4,555	0,138
0,329	22,239	0,023	11,460	24,897	1536,593	0,139	4,237	0,143
0,329	22,239	0,023	11,460	25,217	1549,558	0,181	4,222	0,132
0,329	22,239	0,023	11,460	24,291	1566,559	0,183	3,089	0,127
0,329	22,239	0,023	11,460	26,152	1511,743	0,166	5,747	0,115
0,329	22,239	0,023	11,460	25,958	1518,752	0,197	4,513	0,124
0,329	22,239	0,023	11,460	27,908	1502,675	0,162	4,091	0,123
0,329	22,239	0,023	11,460	24,657	1550,546	0,144	3,059	0,122
0,329	22,239	0,023	11,460	26,381	1513,481	0,158	3,203	0,123
0,329	22,239	0,023	11,460	25,277	1520,055	0,163	4,174	0,133
0,329	22,239	0,023	11,460	25,846	1521,175	0,163	3,950	0,139
0,329	22,239	0,023	11,460	25,716	1540,710	0,164	3,901	0,120
0,329	22,239	0,023	11,460	23,707	1619,750	0,164	3,150	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	27,090	1538,493	0,334	4,263	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	26,686	1563,294	0,348	4,034	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	25,750	1579,272	0,336	4,052	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	26,371	1549,373	0,346	4,247	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	26,563	1581,787	0,358	3,100	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	26,379	1556,900	0,311	5,417	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	26,251	1571,358	0,306	3,998	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	26,501	1577,321	0,313	3,448	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	26,379	1572,296	0,304	3,223	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	25,345	1482,561	0,327	3,142	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	24,086	1476,628	0,335	3,216	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	24,265	1500,644	0,331	3,734	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	24,837	1493,012	0,315	3,492	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	25,426	1481,755	0,267	3,644	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	22,944	1539,830	0,310	4,022	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	24,071	1539,422	0,220	3,937	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	23,133	1510,536	0,303	3,937	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	24,289	1522,658	0,231	3,937	0,135
0,329	22,239	0,023	11,460	23,192	1527,182	0,296	3,937	0,135

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
1,465	21,127	0,332	14,510	27,879	1528,002	0,154	3,800	0,150
1,465	21,127	0,332	14,510	26,899	1547,718	0,149	3,588	0,147
1,465	21,127	0,332	14,510	23,484	1573,833	0,157	4,129	0,135
1,465	21,127	0,332	14,510	25,403	1590,008	0,143	4,071	0,139
1,465	21,127	0,332	14,510	27,239	1509,258	0,183	4,268	0,141
1,465	21,127	0,332	14,510	25,901	1590,226	0,183	3,308	0,141
1,465	21,127	0,332	14,510	23,908	1565,390	0,133	3,124	0,153
1,465	21,127	0,332	14,510	24,670	1574,254	0,160	3,866	0,162
1,465	21,127	0,332	14,510	23,596	1543,883	0,121	3,983	0,154
1,465	21,127	0,332	14,510	23,362	1537,320	0,133	4,281	0,158
1,465	21,127	0,332	14,510	25,010	1529,078	0,163	3,593	0,160
1,465	21,127	0,332	14,510	24,853	1527,103	0,157	4,396	0,140
1,465	21,127	0,332	14,510	27,914	1519,860	0,217	3,903	0,136
1,465	21,127	0,332	14,510	24,181	1536,608	0,162	3,503	0,133
1,465	21,127	0,332	14,510	25,836	1528,399	0,226	3,738	0,153
1,465	21,127	0,332	14,510	24,273	1539,155	0,147	3,421	0,134
1,465	21,127	0,332	14,510	25,411	1519,995	0,154	3,936	0,139
1,465	21,127	0,332	14,510	24,324	1528,072	0,134	4,041	0,149
1,465	21,127	0,332	14,510	23,347	1556,797	0,158	3,906	0,147
1,465	21,127	0,332	14,510	24,905	1529,059	0,143	4,573	0,131
1,465	21,127	0,332	14,510	24,287	1552,151	0,150	4,145	0,161
1,465	21,127	0,332	14,510	26,660	1511,251	0,179	4,703	0,175
1,465	21,127	0,332	14,510	26,520	1511,985	0,226	4,427	0,166
1,465	21,127	0,332	14,510	24,494	1535,194	0,161	4,083	0,157
1,465	21,127	0,332	14,510	25,810	1523,063	0,206	3,206	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	24,064	1530,747	0,207	4,937	0,165
1,465	21,127	0,332	14,510	27,156	1496,922	0,184	3,772	0,147
1,465	21,127	0,332	14,510	25,343	1517,182	0,199	4,486	0,164
1,465	21,127	0,332	14,510	25,768	1550,665	0,152	3,796	0,154
1,465	21,127	0,332	14,510	29,539	1534,452	0,179	4,732	0,152
1,465	21,127	0,332	14,510	27,156	1511,514	0,223	4,088	0,189
1,465	21,127	0,332	14,510	25,028	1555,876	0,176	3,544	0,170
1,465	21,127	0,332	14,510	26,292	1528,417	0,219	3,836	0,183
1,465	21,127	0,332	14,510	26,641	1526,684	0,232	3,408	0,166

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
1,465	21,127	0,332	14,510	25,652	1540,956	0,203	4,358	0,162
1,465	21,127	0,332	14,510	24,735	1543,671	0,181	4,316	0,151
1,465	21,127	0,332	14,510	24,113	1578,660	0,188	3,342	0,160
1,465	21,127	0,332	14,510	26,818	1514,293	0,240	4,117	0,171
1,465	21,127	0,332	14,510	24,480	1535,722	0,162	4,061	0,148
1,465	21,127	0,332	14,510	24,034	1566,269	0,175	3,656	0,155
1,465	21,127	0,332	14,510	24,438	1555,728	0,139	4,736	0,173
1,465	21,127	0,332	14,510	24,123	1574,513	0,133	3,620	0,178
1,465	21,127	0,332	14,510	26,610	1512,014	0,194	4,866	0,165
1,465	21,127	0,332	14,510	24,604	1552,613	0,141	3,542	0,166
1,465	21,127	0,332	14,510	23,911	1568,323	0,141	3,991	0,153
1,465	21,127	0,332	14,510	25,610	1492,683	0,185	3,494	0,151
1,465	21,127	0,332	14,510	25,969	1524,554	0,218	4,555	0,173
1,465	21,127	0,332	14,510	24,622	1543,667	0,158	4,390	0,158
1,465	21,127	0,332	14,510	25,106	1585,625	0,193	4,259	0,168
1,465	21,127	0,332	14,510	23,908	1585,143	0,165	3,461	0,154
1,465	21,127	0,332	14,510	24,585	1563,189	0,141	5,031	0,171
1,465	21,127	0,332	14,510	24,450	1573,750	0,126	4,556	0,158
1,465	21,127	0,332	14,510	25,073	1548,656	0,155	4,087	0,168
1,465	21,127	0,332	14,510	25,940	1522,890	0,170	5,804	0,161
1,465	21,127	0,332	14,510	24,009	1578,189	0,156	4,495	0,141
1,465	21,127	0,332	14,510	26,082	1520,523	0,168	4,298	0,151
1,465	21,127	0,332	14,510	25,983	1518,734	0,213	3,746	0,162
1,465	21,127	0,332	14,510	22,554	1539,299	0,125	4,341	0,141
1,465	21,127	0,332	14,510	24,207	1559,212	0,145	4,716	0,173
1,465	21,127	0,332	14,510	27,336	1564,367	0,313	3,916	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	26,627	1587,552	0,333	4,593	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	26,979	1565,319	0,341	3,941	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	27,451	1564,752	0,329	4,611	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	26,884	1568,018	0,344	4,190	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	27,139	1556,916	0,341	4,559	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	26,446	1581,690	0,351	4,725	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	27,083	1561,092	0,298	4,237	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	23,738	1521,957	0,315	3,942	0,156

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
1,465	21,127	0,332	14,510	24,469	1493,444	0,294	5,317	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	23,882	1531,203	0,297	4,617	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	23,080	1540,219	0,301	3,298	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	25,065	1489,691	0,297	3,395	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	23,826	1532,241	0,275	4,108	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	23,347	1525,676	0,283	4,108	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	23,607	1523,909	0,200	4,108	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	23,588	1528,574	0,200	4,108	0,156
1,465	21,127	0,332	14,510	23,576	1517,845	0,200	4,108	0,156
1,563	13,186	0,308	16,820	30,369	1460,401	0,268	4,939	0,105
1,563	13,186	0,308	16,820	29,574	1501,456	0,329	4,533	0,116
1,563	13,186	0,308	16,820	30,354	1473,982	0,280	3,880	0,108
1,563	13,186	0,308	16,820	30,251	1495,108	0,283	4,015	0,120
1,563	13,186	0,308	16,820	29,778	1500,992	0,282	3,676	0,116
1,563	13,186	0,308	16,820	30,701	1450,698	0,303	3,955	0,132
1,563	13,186	0,308	16,820	30,019	1460,227	0,317	4,405	0,121
1,563	13,186	0,308	16,820	29,369	1492,669	0,274	3,846	0,116
1,563	13,186	0,308	16,820	29,494	1482,307	0,276	3,713	0,121
1,563	13,186	0,308	16,820	30,866	1460,687	0,279	3,979	0,111
1,563	13,186	0,308	16,820	30,228	1460,276	0,278	4,085	0,122
1,563	13,186	0,308	16,820	29,385	1492,749	0,328	3,796	0,133
1,563	13,186	0,308	16,820	28,456	1518,013	0,349	4,233	0,130
1,563	13,186	0,308	16,820	29,381	1482,797	0,316	4,488	0,120
1,563	13,186	0,308	16,820	29,447	1480,958	0,319	3,763	0,110
1,563	13,186	0,308	16,820	30,289	1489,395	0,320	3,747	0,128
1,563	13,186	0,308	16,820	30,648	1476,670	0,316	3,745	0,104
1,563	13,186	0,308	16,820	32,111	1441,388	0,287	3,997	0,121
1,563	13,186	0,308	16,820	30,427	1461,474	0,264	4,416	0,129
1,563	13,186	0,308	16,820	31,394	1456,101	0,344	3,988	0,130
1,563	13,186	0,308	16,820	31,306	1467,960	0,339	4,180	0,120
1,563	13,186	0,308	16,820	30,540	1445,124	0,277	4,741	0,118
1,563	13,186	0,308	16,820	29,675	1475,647	0,311	4,101	0,107
1,563	13,186	0,308	16,820	29,473	1503,989	0,327	4,109	0,104
1,563	13,186	0,308	16,820	29,881	1456,780	0,296	3,216	0,117

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
1,563	13,186	0,308	16,820	30,136	1478,421	0,310	4,593	0,118
1,563	13,186	0,308	16,820	29,781	1473,417	0,328	4,340	0,118
1,563	13,186	0,308	16,820	31,440	1453,244	0,291	3,455	0,124
1,563	13,186	0,308	16,820	30,522	1464,108	0,290	3,421	0,117
1,563	13,186	0,308	16,820	31,460	1461,648	0,296	4,391	0,117
1,563	13,186	0,308	16,820	30,937	1472,114	0,304	3,694	0,131
1,563	13,186	0,308	16,820	31,126	1468,913	0,336	3,696	0,119
1,563	13,186	0,308	16,820	30,772	1492,645	0,306	4,099	0,110
1,563	13,186	0,308	16,820	30,104	1486,951	0,315	4,477	0,116
1,563	13,186	0,308	16,820	30,008	1469,516	0,287	3,643	0,111
1,563	13,186	0,308	16,820	30,237	1491,349	0,337	4,312	0,106
1,563	13,186	0,308	16,820	31,100	1454,772	0,301	3,775	0,115
1,563	13,186	0,308	16,820	30,183	1492,399	0,395	3,715	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	30,363	1468,362	0,324	3,773	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	29,831	1460,059	0,284	3,815	0,111
1,563	13,186	0,308	16,820	28,264	1510,924	0,327	2,927	0,110
1,563	13,186	0,308	16,820	30,222	1467,148	0,296	3,710	0,121
1,563	13,186	0,308	16,820	28,890	1481,705	0,334	4,962	0,106
1,563	13,186	0,308	16,820	30,206	1482,095	0,309	4,149	0,112
1,563	13,186	0,308	16,820	30,625	1471,768	0,303	3,657	0,110
1,563	13,186	0,308	16,820	31,058	1455,956	0,341	4,307	0,092
1,563	13,186	0,308	16,820	31,342	1482,609	0,340	3,587	0,091
1,563	13,186	0,308	16,820	30,962	1467,432	0,353	3,338	0,105
1,563	13,186	0,308	16,820	28,878	1503,409	0,315	3,286	0,087
1,563	13,186	0,308	16,820	29,802	1483,565	0,300	3,936	0,112
1,563	13,186	0,308	16,820	29,719	1461,729	0,292	3,758	0,120
1,563	13,186	0,308	16,820	25,912	1514,838	0,276	3,595	0,107
1,563	13,186	0,308	16,820	29,545	1475,035	0,305	3,930	0,100
1,563	13,186	0,308	16,820	30,863	1460,470	0,434	3,540	0,113
1,563	13,186	0,308	16,820	29,312	1496,825	0,330	5,195	0,115
1,563	13,186	0,308	16,820	28,708	1519,286	0,318	3,779	0,108
1,563	13,186	0,308	16,820	30,875	1465,963	0,308	3,850	0,099
1,563	13,186	0,308	16,820	29,486	1498,502	0,336	3,998	0,095
1,563	13,186	0,308	16,820	29,507	1480,364	0,295	3,776	0,097

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
1,563	13,186	0,308	16,820	27,427	1537,466	0,244	3,583	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	26,773	1554,436	0,287	3,778	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	26,198	1551,055	0,347	4,324	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	26,624	1569,159	0,307	4,540	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	26,026	1541,203	0,333	3,370	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	27,708	1538,622	0,314	3,801	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	26,396	1550,785	0,317	3,801	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	26,131	1551,205	0,304	3,855	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	26,072	1555,673	0,325	3,465	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	26,683	1553,604	0,331	3,625	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	23,720	1522,266	0,338	3,604	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	24,018	1504,868	0,327	3,629	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	25,457	1466,959	0,315	3,818	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	24,565	1523,113	0,310	3,934	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	24,223	1520,765	0,327	3,934	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	24,206	1560,943	0,340	3,934	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	23,677	1505,235	0,331	3,934	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	23,957	1561,714	0,308	3,934	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	25,063	1493,902	0,337	3,934	0,114
1,563	13,186	0,308	16,820	25,193	1506,683	0,306	3,934	0,114
0,397	20,705	0,037	16,540	22,231	1558,570	0,174	3,870	0,112
0,397	20,705	0,037	16,540	21,968	1577,669	0,173	4,139	0,128
0,397	20,705	0,037	16,540	21,577	1571,760	0,163	3,786	0,121
0,397	20,705	0,037	16,540	21,873	1570,978	0,144	5,079	0,130
0,397	20,705	0,037	16,540	22,024	1575,848	0,091	4,455	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	21,912	1582,390	0,133	5,177	0,137
0,397	20,705	0,037	16,540	20,366	1606,409	0,174	5,583	0,119
0,397	20,705	0,037	16,540	21,383	1577,199	0,159	5,240	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	21,898	1571,028	0,170	4,700	0,129
0,397	20,705	0,037	16,540	21,277	1563,905	0,172	4,974	0,132
0,397	20,705	0,037	16,540	21,951	1564,255	0,170	4,697	0,122
0,397	20,705	0,037	16,540	21,487	1589,148	0,194	4,907	0,123
0,397	20,705	0,037	16,540	23,494	1591,540	0,182	4,591	0,129
0,397	20,705	0,037	16,540	22,437	1573,535	0,241	5,560	0,131

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
0,397	20,705	0,037	16,540	20,144	1579,921	0,193	5,129	0,136
0,397	20,705	0,037	16,540	22,019	1583,258	0,193	5,449	0,157
0,397	20,705	0,037	16,540	22,005	1595,877	0,173	4,933	0,140
0,397	20,705	0,037	16,540	20,851	1571,288	0,140	6,197	0,132
0,397	20,705	0,037	16,540	22,947	1563,922	0,182	5,633	0,152
0,397	20,705	0,037	16,540	23,127	1709,255	0,178	2,816	0,132
0,397	20,705	0,037	16,540	21,965	1579,446	0,227	4,242	0,137
0,397	20,705	0,037	16,540	21,695	1586,448	0,212	5,028	0,123
0,397	20,705	0,037	16,540	23,989	1594,286	0,200	4,090	0,136
0,397	20,705	0,037	16,540	22,977	1553,294	0,183	3,505	0,150
0,397	20,705	0,037	16,540	21,588	1571,034	0,213	5,081	0,160
0,397	20,705	0,037	16,540	21,110	1563,806	0,177	5,531	0,147
0,397	20,705	0,037	16,540	22,195	1591,700	0,187	4,763	0,144
0,397	20,705	0,037	16,540	22,474	1560,282	0,193	6,138	0,159
0,397	20,705	0,037	16,540	22,570	1553,299	0,168	5,349	0,130
0,397	20,705	0,037	16,540	22,724	1555,641	0,198	5,031	0,141
0,397	20,705	0,037	16,540	24,016	1551,974	0,213	3,583	0,139
0,397	20,705	0,037	16,540	21,760	1574,067	0,211	4,030	0,136
0,397	20,705	0,037	16,540	23,329	1598,359	0,211	4,873	0,139
0,397	20,705	0,037	16,540	23,300	1582,560	0,212	4,790	0,142
0,397	20,705	0,037	16,540	23,029	1555,654	0,183	4,504	0,154
0,397	20,705	0,037	16,540	21,182	1560,779	0,142	5,681	0,144
0,397	20,705	0,037	16,540	21,631	1562,869	0,180	5,325	0,139
0,397	20,705	0,037	16,540	22,946	1572,844	0,187	5,322	0,143
0,397	20,705	0,037	16,540	22,434	1558,971	0,182	6,457	0,136
0,397	20,705	0,037	16,540	22,772	1575,589	0,181	5,993	0,158
0,397	20,705	0,037	16,540	21,395	1588,147	0,152	4,692	0,153
0,397	20,705	0,037	16,540	21,387	1586,463	0,192	5,257	0,156
0,397	20,705	0,037	16,540	27,219	1584,639	0,327	5,687	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	26,601	1592,538	0,291	5,386	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	27,368	1589,366	0,312	4,883	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	26,926	1584,093	0,290	5,313	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	26,112	1605,098	0,337	3,946	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,958	1679,866	0,302	4,698	0,138

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
0,397	20,705	0,037	16,540	26,543	1598,871	0,286	5,426	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	26,828	1592,098	0,329	6,185	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	26,403	1597,520	0,321	4,782	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	26,608	1591,967	0,341	4,907	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,238	1597,080	0,354	5,387	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,524	1600,831	0,334	3,655	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,149	1602,526	0,320	5,589	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,440	1578,406	0,349	4,575	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,893	1602,239	0,295	4,431	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,284	1579,627	0,322	4,125	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,883	1598,454	0,342	4,521	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,624	1612,402	0,301	4,002	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,878	1590,121	0,326	3,347	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,050	1592,767	0,179	4,795	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,042	1603,673	0,187	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,491	1598,636	0,224	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,761	1583,543	0,224	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,686	1576,953	0,177	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	25,077	1566,655	0,186	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,020	1615,055	0,246	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,390	1597,151	0,208	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,138	1603,239	0,184	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,063	1590,325	0,250	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,561	1631,422	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	22,840	1627,723	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,607	1593,624	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,308	1620,410	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	22,737	1622,823	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,305	1609,072	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,964	1617,925	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,778	1584,810	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	24,784	1611,259	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,266	1612,205	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,647	1527,196	0,222	4,868	0,138

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
0,397	20,705	0,037	16,540	23,575	1553,975	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	22,898	1550,481	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,275	1538,874	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	22,245	1570,083	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	22,103	1565,834	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	23,244	1543,388	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	22,296	1558,309	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	22,259	1574,290	0,222	4,868	0,138
0,397	20,705	0,037	16,540	22,337	1625,665	0,222	4,868	0,138
0,454	20,711	0,104	18,330	21,788	1563,959	0,219	6,354	0,131
0,454	20,711	0,104	18,330	22,107	1555,088	0,230	5,916	0,160
0,454	20,711	0,104	18,330	21,944	1554,309	0,212	7,288	0,129
0,454	20,711	0,104	18,330	21,089	1574,282	0,235	6,919	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	22,488	1558,490	0,217	6,724	0,112
0,454	20,711	0,104	18,330	22,623	1565,921	0,290	6,707	0,116
0,454	20,711	0,104	18,330	21,567	1568,183	0,250	5,120	0,122
0,454	20,711	0,104	18,330	22,638	1580,100	0,222	5,756	0,135
0,454	20,711	0,104	18,330	22,217	1570,279	0,240	6,664	0,130
0,454	20,711	0,104	18,330	23,481	1588,788	0,248	6,572	0,164
0,454	20,711	0,104	18,330	22,603	1567,750	0,250	4,324	0,130
0,454	20,711	0,104	18,330	23,201	1533,700	0,296	7,027	0,131
0,454	20,711	0,104	18,330	21,562	1564,479	0,245	6,355	0,135
0,454	20,711	0,104	18,330	23,335	1571,641	0,258	6,006	0,132
0,454	20,711	0,104	18,330	21,422	1546,572	0,271	6,437	0,116
0,454	20,711	0,104	18,330	22,697	1564,880	0,226	6,766	0,122
0,454	20,711	0,104	18,330	21,880	1569,103	0,262	6,439	0,124
0,454	20,711	0,104	18,330	22,743	1561,683	0,227	6,190	0,126
0,454	20,711	0,104	18,330	21,399	1563,013	0,235	6,261	0,148
0,454	20,711	0,104	18,330	23,100	1562,857	0,282	6,652	0,113
0,454	20,711	0,104	18,330	22,103	1567,196	0,234	6,385	0,137
0,454	20,711	0,104	18,330	23,149	1621,922	0,294	6,208	0,124
0,454	20,711	0,104	18,330	22,206	1606,932	0,299	7,418	0,132
0,454	20,711	0,104	18,330	22,222	1579,231	0,309	5,092	0,119
0,454	20,711	0,104	18,330	22,010	1503,209	0,284	7,125	0,124

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
0,454	20,711	0,104	18,330	22,687	1577,902	0,301	6,376	0,123
0,454	20,711	0,104	18,330	23,104	1550,427	0,276	3,873	0,120
0,454	20,711	0,104	18,330	22,846	1564,107	0,315	5,932	0,119
0,454	20,711	0,104	18,330	27,947	1522,642	0,300	6,002	0,122
0,454	20,711	0,104	18,330	22,330	1577,759	0,302	4,644	0,124
0,454	20,711	0,104	18,330	22,269	1570,106	0,285	6,608	0,119
0,454	20,711	0,104	18,330	22,067	1592,177	0,283	6,718	0,118
0,454	20,711	0,104	18,330	22,253	1571,079	0,296	6,045	0,116
0,454	20,711	0,104	18,330	22,336	1586,075	0,291	5,800	0,124
0,454	20,711	0,104	18,330	23,098	1577,902	0,283	6,221	0,121
0,454	20,711	0,104	18,330	22,800	1573,264	0,273	6,342	0,111
0,454	20,711	0,104	18,330	22,366	1580,756	0,255	5,347	0,104
0,454	20,711	0,104	18,330	23,346	1588,612	0,307	4,922	0,119
0,454	20,711	0,104	18,330	22,947	1569,172	0,291	5,223	0,120
0,454	20,711	0,104	18,330	23,053	1569,253	0,219	6,176	0,108
0,454	20,711	0,104	18,330	23,086	1577,249	0,200	7,510	0,132
0,454	20,711	0,104	18,330	23,135	1575,503	0,214	6,490	0,120
0,454	20,711	0,104	18,330	26,407	1589,759	0,127	6,098	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	25,504	1636,098	0,206	6,922	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	26,458	1617,797	0,189	5,599	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	26,133	1624,582	0,238	8,238	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	25,133	1612,386	0,195	5,557	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	26,242	1604,691	0,153	5,480	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	26,333	1607,047	0,192	5,367	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	23,790	1673,846	0,286	6,734	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	25,737	1619,748	0,284	4,254	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	25,688	1629,742	0,271	4,322	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	21,634	1593,499	0,300	6,106	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	22,745	1550,808	0,261	6,106	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	21,785	1547,154	0,294	6,106	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	21,896	1593,614	0,280	6,106	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	22,573	1542,258	0,255	6,106	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	22,612	1566,088	0,255	6,106	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	21,786	1559,762	0,255	6,106	0,125

Continuação								
DADOS DO SUPORTE				DADOS DA ARGAMASSA				
Permeabilidade ao vapor de água	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Porosidade aberta	Porosidade aberta	Massa volúmica	Coefficiente de absorção por capilaridade	Resistência à compressão	Índice de secagem
0,454	20,711	0,104	18,330	22,551	1589,820	0,255	6,106	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	23,088	1527,361	0,255	6,106	0,125
0,454	20,711	0,104	18,330	23,407	1523,563	0,255	6,106	0,125