



Rui Miguel Vilas-Boas Piteira

Licenciado em Ciências da Engenharia

Argamassas de cal hidráulica natural com resíduos de borracha da recauchutagem de pneus

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida

Arguente: Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar

Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho de 2015

“Copyright” Rui Miguel Vilas-Boas Piteira

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado o crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação simboliza o percorrer de um longo percurso e marca um ponto muito importante na minha vida. Sozinho, isto não era atingível e por isso expresso aqui os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar quero agradecer à Professora Doutora Paulina Faria, orientadora da presente dissertação, pela orientação e ajuda prestadas, pelo ensino transmitido, e pela oportunidade que tive de trabalhar consigo. Quero agradecer também pela disponibilidade e interesse pelo tema, que sem eles não seria possível a realização do artigo conjunto no congresso “European Mortar Summit 2015”.

Agradeço ao Engenheiro Vítor Silva pela ajuda e prontidão ao longo de toda a campanha experimental, à sua disponibilidade para resolver quaisquer dúvidas ou problemas que aparecessem, e à boa disposição contagiante de que se faz acompanhar.

Um agradecimento ao João Paulo Carneiro, da empresa *BANDAGUE, S.A.*, pela presteza e simpatia na disponibilização do resíduo de borracha proveniente da recauchutagem de pneus.

Aos colegas que me ajudaram na realização de ensaios ao longo da campanha experimental: Ana Rita Lobato e Diogo Val.

Quero agradecer aos meus amigos e colegas de curso Filipe Nogueira, João Duarte e Pedro Parreira, por todo o caminho que percorremos juntos praticamente desde o primeiro dia. A vossa força e amizade foram importantíssimas ao longo destes últimos anos.

Um especial agradecimento para todos os meus amigos, mas em especial ao Gonçalo Relvas, João Fole, Tiago Pássaro e Alice Guerra por toda a amizade e encorajamento mostrado, que desde sempre assim o é. Vocês fizeram-me perceber que a amizade não se mede à distância.

Quero também agradecer à Marisa Sim Sim e José Couto por todo o carinho, amizade e hospitalidade demonstradas, e em especial, à vossa boa disposição que muito importante foi ao longo do período de realização deste trabalho.

À Inês, o meu pilar, por todos os conselhos, gargalhadas, carinho, amizade e dedicação. A tua força e apoio incansável e constante foram essenciais ao longo deste trajeto.

Finalmente à minha família, e em especial ao meu pai, José Piteira, à minha mãe, Vitória Vilas-Boas e à minha avó, Luísa Lourenço. Agradeço pela educação que me deram, pelo amor e o carinho que sempre me transmitiram, e pela orientação ao longo de toda a minha vida. Sem vocês isto nunca seria possível.

RESUMO

Existe uma consciencialização global e crescente do modo como o ser humano afeta diretamente o ambiente. É notável a preocupação exponencial com a sustentabilidade ambiental aos mais diversos níveis, preocupação esta ligada também ao setor da construção.

É um dado adquirido que uma das grandes problemáticas ambientais da nossa geração é a reciclagem de pneus, estando o seu número de produção e consumo a atingir níveis elevadíssimos. Para atenuar estes níveis de poluição, e principalmente para diminuir gastos, as fábricas de recauchutagem reaproveitam grande parte de pneus usados, substituindo-lhes a parte de borracha degradada por nova. A problemática é também assunto recorrente em Portugal, onde nas últimas décadas tem havido uma grande preocupação no seu tratamento por forma a evitar um elevado aumento de poluição, embora muitas fábricas de recauchutagens tenham vindo a encerrar nos últimos anos.

A presente dissertação insere-se na procura de soluções para os resíduos inerentes à recauchutagem de pneus, estudando argamassas de cal hidráulica natural NHL3,5 com a adição de resíduos de borracha desta indústria. Foram realizadas argamassas com partículas de resíduo de borracha cuja dimensão é inferior a 2,36 mm. Os resíduos foram diferenciados em três tipos: resíduo “fino” (Fr), com partículas de dimensão inferior a 0,212 mm; resíduo “médio” (Mr), com partículas de dimensão entre os 0,212 mm e os 0,6 mm; e resíduo “grosso” (Cr), com partículas entre os 0,6 mm e os 2,36 mm. Com a mistura integral do resíduo, foram feitas formulações de argamassas com adição de 2,5%, 5% e 7,5% relativas à massa de areia, sendo posteriormente feitas argamassas com 5% de adição apenas de cada uma das identificadas.

Os resultados obtidos mostram que as argamassas com resíduo de borracha menor resistência à tração e à compressão, mas apresentam menor módulo de elasticidade dinâmico e condutibilidade térmica, características que as podem tornar mais adequadas para alguns tipos de aplicações na construção. Particularmente a argamassa com 5% de mistura de frações granulométricas apresenta características que justificam o aprofundamento da sua caracterização, para otimização como argamassa a ser industrializada.

Termos chave: Argamassa; Cal hidráulica natural; Borracha; Pneu usado; Reciclagem; Resíduo de borracha

ABSTRACT

There is a global and growing awareness of how human beings directly affect the environment. It is remarkable the exponential concern with environmental sustainability to the most diverse levels, and namely, linked to the construction sector.

It is known that one of the big environmental problems of our generation is the recycling of tires, which have their number of production and consumption reaching very high levels. To reduce these pollution levels, retreading factories recycle much of the used tires, replacing the rubber degraded part by new material. The problematic is also subject applicant in Portugal, where in recent decades there has been a major concern in its treatment in order to avoid a high increase of pollution. Nevertheless many retreading factories have been shut down in recent years.

The present dissertation aims to contribute seeking solutions to the waste inherent in the retreading of tires, with the study of natural hydraulic lime mortars NHL3,5 with the addition of rubber residues of this industry. Mortars were formulated with waste rubber particles whose size is less than 2.36 mm. The rubber was differentiated into three types: "fine" waste, with particles smaller than 0.212 mm; "mean" waste, with particles of size between 0.212 mm and 0.6 mm; and "coarse" residue, with particles between 0.6 mm and 2.36 mm. Depending on the particle size, mixtures were formulated with addition of 2.5%, 5% and 7.5% (by weight of sand) of the waste mix, being subsequently produced mortars for 5% of each of the three types of fractions previously identified.

The results obtained show that mortars with rubber wastes present a decrease on compressive and tensile strength, but also decrease of dynamic modulus of elasticity and thermal conductivity, what may be advantageous for some types of applications. The mortar with 5% of the mix of fractions of waste presents characteristics that justify further research to optimize formulation for industrialized mortars.

Keywords: Mortar; Natural hydraulic lime; Rubber; Used tire, Recycling; Waste tire rubber

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

Materiais

APAS 12 – Areia de granulometria grossa

APAS 20 – Areia de granulometria intermédia

APAS 30 – Areia de granulometria fina

APAS 120 – Areia de granulometria muito fina

Cr – Borracha de granulometria grossa

Mr – Borracha de granulometria média

Fr – Borracha de granulometria fina

NHL – Cal hidráulica natural 3.5

Ref – Argamassa de cal hidráulica natural 3.5

MIXr_2.5 – Argamassa de cal hidráulica natural 3.5 com adição de 2.5% de mistura de borracha de diferentes frações granulométricas

MIXr_5 – Argamassa de cal hidráulica natural 3.5 com adição de 5% de mistura de borracha de diferentes frações granulométricas

MIXr_7.5 – Argamassa de cal hidráulica natural 3.5 com adição de 7.5% de mistura de borracha de diferentes frações granulométricas

Cr_5 – Argamassa de cal hidráulica natural 3.5 com adição de 5% de resíduo de borracha de granulometria grossa

Mr_5 – Argamassa de cal hidráulica natural 3.5 com adição de 5% de resíduo de borracha de granulometria média

Fr_5 – Argamassa de cal hidráulica natural 3.5 com adição de 5% de resíduo de borracha de granulometria fina

Ensaio e parâmetros

CC – Coeficiente de absorção de água por capilaridade [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$]

Esp – Consistência por espalhamento [mm]

DP – Desvio padrão [-]

HR – Humidade relativa [%]

IS – Índice de secagem [-]

Méd – Valor médio [-]

MVA – Massa volúmica aparente [kg/m^3]

Ea – Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]

P_{ab} – Porosidade aberta [%]

MIP – Porosimetria por intrusão de mercúrio [-]

R_c – Resistência à compressão [MPa]

R_t – Resistência à tração por flexão [MPa]

TS – Taxa de secagem [kg/m².h]

VA – Valor assintótico de absorção capilar [kg/m³]

Índice de Texto

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Motivações	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização do Texto	2
2	Estado do Conhecimento	3
2.1	A Problemática dos Pneus Usados	3
2.1.1	Definição de pneu.....	3
2.1.2	Impacte Ambiental	4
2.1.3	Legislação em Portugal	7
2.1.4	Recauchutagem de Pneus em Portugal.....	7
2.2	Características e propriedades dos elastómeros.....	10
2.3	Argamassas com incorporação de resíduos	10
3	Procedimentos da Campanha Experimental	22
3.1	Introdução.....	22
3.2	Planificação da Campanha Experimental.....	22
3.3	Constituintes das Argamassas	23
3.4	Primeira Fase: Caracterização dos Constituintes das Argamassas	25
3.4.1	Análise Granulométrica.....	25
3.4.2	Baridade.....	26
3.5	Segunda Fase: Produção das Argamassas	27
3.5.1	Amassadura	27
3.5.2	Ensaios no estado fresco.....	30
3.5.3	Produção dos provetes.....	33
3.5.4	Condições de cura	33
3.6	Terceira Fase: Ensaios Mecânicos e de Durabilidade das Argamassas.....	34
3.6.1	Módulo de Elasticidade Dinâmico	34
3.6.2	Resistência à tração por flexão	35
3.6.3	Resistência à compressão	36
3.6.4	Absorção de água por Capilaridade.....	37
3.6.5	Secagem.....	39
3.6.6	Condutibilidade Térmica.....	40
3.6.7	Massa Volúmica Aparente e Porosidade Aberta	41
3.6.8	Permeabilidade ao Vapor de Água	43
3.6.9	Porosimetria de Mercúrio	45
4	Resultados da Campanha Experimental	47

4.1	Materiais constituintes das argamassas	47
4.1.1	Análise granulométrica.....	47
4.1.2	Baridade.....	48
4.2	Dosagens e argamassas no estado fresco.....	48
4.2.1	Dosagens das argamassas	48
4.2.2	Consistência por espalhamento	49
4.2.3	Retenção de água.....	50
4.2.4	Massa volúmica.....	50
4.2.5	Teor de ar e consistência por penetrómetro.....	51
4.3	Argamassas no estado endurecido.....	51
4.3.1	Módulo de elasticidade dinâmico	51
4.3.2	Resistência à tração por flexão	52
4.3.3	Resistência à compressão	53
4.3.4	Absorção de água por capilaridade.....	54
4.3.5	Secagem.....	57
4.3.6	Condutibilidade Térmica	60
4.3.7	Massa volúmica aparente e porosidade aberta	61
4.3.8	Permeabilidade ao vapor de água	63
4.3.9	Porosimetria de mercúrio	64
4.4	Discussão dos resultados	65
4.4.1	Análise global dos resultados obtidos	65
4.4.2	Análise à argamassa no estado fresco	66
4.4.3	Análise às resistências mecânicas e módulo de elasticidade	66
4.4.4	Análise do comportamento face à água.....	67
4.4.5	Verificação dos parâmetros de classificação de argamassas	67
4.5	Apreciação do comportamento das argamassas	68
5	Conclusões.....	71
5.1	Considerações finais.....	71
5.2	Desenvolvimentos futuros	72

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Componentes de um pneu.....	4
Figura 2.2 - Registo médio de pneus recauchutados	9
Figura 3.1 - Cal hidráulica natural NHL 3.5 utilizada na confeção das argamassas	23
Figura 3.2 - Quatro tipos de areia utilizados na confeção das argamassas.....	24
Figura 3.3 - Misturador mecânico e peneiros utilizados na análise granulométrica	26
Figura 3.4 - Três grupos de diferentes frações granulométricas de resíduo de borracha	28
Figura 3.5 - Agregados constituintes da argamassa no estado seco	29
Figura 3.6 - Ensaio de espalhamento da argamassa antes e após as 15 pancadas	30
Figura 3.7 - Ensaio de consistência por penetrómetro da argamassa	31
Figura 3.8 - Ensaio de retenção de água da argamassa	32
Figura 3.9 - Produção dos provetes prismáticos e cilíndricos da argamassa.....	33
Figura 3.10 - Equipamento "Zeus Resonance Meter"	34
Figura 3.11 - Equipamento "ZWICK" e provete ensaiado à flexão por tração	35
Figura 3.12 - Ensaio e rotura à compressão de um provete prismático da argamassa	37
Figura 3.13 - Provetes cúbicos cortados com serrote com 4 cm de aresta	38
Figura 3.14 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	38
Figura 3.15 - Ensaio de secagem: a) provete com película aderente na base; b) provetes na sala	40
Figura 3.16 - Aparelho "Isomet" para medição da condutibilidade térmica	41
Figura 3.17 - Provelte ensaiado resultante do ensaio de compressão.....	42
Figura 3.18 - Balança de precisão de 0,001 g.....	42
Figura 3.19 - Permeabilidade ao vapor de água	44
Figura 3.20 – Porosímetro Autopore e entradas do penemómetro de baixa pressão.....	46
Figura 4.1 - Curva granulométrica de cada areia e da mistura de areias	47
Figura 4.2 - Curvas granulométricas de cada fração granulométrica e da mistura utilizadas	47
Figura 4.3 - Massa volúmica no estado fresco e geométrica para os diferentes tipos de argamassa.....	50
Figura 4.4 - Módulo de elasticidade dinâmico das diferentes argamassas	52
Figura 4.5 – Resistência à tração por flexão para as diferentes argamassas.....	53
Figura 4.6 - Valores da resistência à compressão para as argamassas ensaiadas	54

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Consumos de recursos, ar e água	5
Quadro 2.2 - Emissões de recursos, ar e água	6
Quadro 2.3 - Quadro-resumo de estudos sobre argamassas com substituição de borracha.....	13
Quadro 2.4 - Quadro-resumo de estudos sobre argamassas com adição de resíduo de borracha.....	16
Quadro 2.5 - Quadro-resumo de argamassas com substituição de areia por resíduos.....	17
Quadro 2.6 - Quadro-resumo de ensaios de resistência mecânica dos estudos analisados	18
Quadro 2.7 - Quadro-resumo de ensaios de condutibilidade térmica e isolamento acústico	20
Quadro 3.1 - Quantidades de massa dos materiais utilizados para a confeção das argamassas	29
Quadro 3.2 - Pressão de saturação em função da temperatura	45
Quadro 4.1 - Baridade dos agregados e ao ligante	48
Quadro 4.2 - Massa dos constituintes das argamassas, traços em massa e em volume.....	49
Quadro 4.3 – Consistência por espalhamento e por penetrómetro das argamassas.....	49
Quadro 4.4 - Retenção de água das argamassas	50
Quadro 4.5 – Resultados de teor de ar e penetrómetro.....	51
Quadro 4.6 - Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico	51
Quadro 4.7 - Valores médios e desvio padrão da resistência à tração por flexão	52
Quadro 4.8 - Valores médios e de desvio padrão para a resistência à compressão	53
Quadro 4.9 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico para os vários tipos de argamassa.....	56
Quadro 4.10 - Taxa de secagem e índice de secagem	59
Quadro 4.11 - Condutibilidade térmica	61
Quadro 4.12 - Porosidade aberta e massa volúmica.....	62
Quadro 4.13 – Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de ar	63
Quadro 4.14 – Resistência à difusão e espessura da camada equivalente	64
Quadro 4.15 - Síntese global dos resultados	65
Quadro 4.16 – Parâmetros de aplicação das argamassas, segundo EN 998:1-2010	68
Quadro 4.17 - Comparação de resultados	69

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Motivações

Durante as últimas décadas nos países desenvolvidos e também, mais recentemente, nos países em desenvolvimento, tem-se registado uma melhoria significativa na vida das populações.

Este fenómeno tem levado a uma alteração do estilo de vida do ser humano, fazendo aumentar o nível de exigência e provocado um aumento do tipo e quantidade de resíduos, sendo esta uma das principais problemáticas do mundo atual.

Como é do senso comum, um dos tipos mais importantes de resíduos são os pneus, cuja quantidade a nível mundial tem vindo também a aumentar muito devido ao crescimento da indústria automóvel. A utilização dos pneus trouxe consigo a questão da proteção ambiental uma vez que a maior parte dos pneus usados era abandonada em locais inadequados, constituindo um risco para o ambiente e para a saúde pública. De modo a combater esta situação, vários países têm vindo a elaborar legislação com o intuito de submeter os pneus usados a uma gestão cuidada, procurando encontrar ambientes destinados a uma deposição deste resíduo que seja menos prejudicial ao ambiente e à saúde pública.

Uma vez que é proibido por lei a deposição de pneus a céu aberto, estes podem ser reciclados ou recauchutados. Este último processo envolve a criação de uma quantidade relevante de resíduos de borracha, tendo mais recentemente aplicação no sector da construção. A Valorpneu é uma empresa gestora de pneus usados, fazendo anualmente em Portugal balanços da utilização de resíduos de borracha em diversas áreas. Como indicado no seu site [SI 1], 28,5% do resíduo de borracha produzido pelas empresas de recauchutagem nacionais foi utilizado em pavimentos, sendo maioritariamente aplicado em relvados sintéticos (60,4%).

Apesar de este tema já ter vindo a ser estudado nos últimos anos por investigadores internacionais, ainda não foram abordadas muitas das propriedades necessárias a um bom desempenho da argamassa em obra, nomeadamente como revestimento de parede. Por outro lado, ainda não foi estudada a adição de borracha da recauchutagem de pneus em argamassas de cal hidráulica natural NHL3,5.

Em estudos já realizados, como Segre (1999) e Turatsinze et al. (2005), a introdução de resíduos de borracha de pneus usados prejudica diretamente as resistências das argamassas, mas, torna-as mais flexíveis existindo um decréscimo dos seus valores de módulo de elasticidade.

1.2 Objetivos

O objetivo pretendido para esta dissertação é aferir a viabilidade de introdução de resíduos da recauchutagem de pneus na construção civil. Em concreto, aferir a influência da sua adição no fabrico de argamassas de cal hidráulica natural, ao traço volumétrico de 1:3 de ligante e agregado. Pretende-se conhecer características mecânicas e físicas da argamassa e do resíduo em questão.

Pretende-se que o contributo seja feito no sentido de fornecer dados para o conhecimento do comportamento deste tipo de argamassas para a possibilidade de utilização na construção civil hoje em dia.

As suas finalidades podem ser diversas, consoante os valores de resistência e deformabilidade pretendidos para aplicação.

1.3 Organização do Texto

A dissertação foi dividida essencialmente em cinco capítulos. No atual capítulo faz-se a estruturação do trabalho, como explanação do texto e do tema em si.

O segundo capítulo trata o estado do conhecimento atual, não só na área das argamassas mas também na área dos pneus usados. Quanto às argamassas, a pesquisa não foi muito aprofundada devido aos inúmeros trabalhos feitos na área. Por sua vez, a pesquisa feita sobre o assunto dos pneus foi muito abrangente. Fez-se a definição, composição e caracterizou-se o pneu, sendo também tratado os impactes ambientais causados, legislação em vigor sobre resíduos e sua obtenção.

O terceiro capítulo explana a campanha experimental efetuada, o seu planeamento e realização. Aqui descrevem-se os materiais utilizados, tipos de amassadura e procedimentos de ensaio às argamassas no estado fresco e endurecido. Note-se que a campanha experimental foi realizada em três fases distintas, com a peculiaridade de uma certa fase não se poder iniciar sem a anterior. São estas: preparação dos constituintes das argamassas, produção das argamassas e provetes, e por fim os ensaios mecânicos e de durabilidade às argamassas.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados obtidos do decorrer dos ensaios efetuados às argamassas com recurso a quadros e figuras. É feita uma comparação de resultados preliminar, em relação aos diferentes tipos de argamassa produzidos. Analisa-se também ao pormenor os resultados, sendo feita uma comparação entre resultados do mesmo ensaio e com os demais para obter uma melhor caracterização da argamassa. Os valores foram também comparados com resultados de outros autores

O quinto capítulo apresenta as conclusões principais retiradas da elaboração desta dissertação, bem como futuros trabalhos a realizar no seu âmbito.

2 Estado do Conhecimento

2.1 A Problemática dos Pneus Usados

2.1.1 Definição de pneu

O pneu é um objeto observável no dia-a-dia do ser humano, presente e indispensável na maioria dos veículos em que este se desloca. Especificamente, um pneu é o produto de uma mistura de materiais, com características muito diferentes entre si. É um objeto circular e de cor negra, devido à incorporação de negro de fumo na borracha para evitar o rápido desgaste do pneu (Pedro, 2011). Segundo o artigo 2º do Decreto-Lei nº111/2001, de 6 de Abril [DL 1], são distintas três definições específicas para o tipo de pneu em causa:

- Pneu – são os pneus utilizados em veículos motorizados, aeronaves, reboques, velocípedes e outros equipamentos motorizados ou não, que os contenham;
- Pneu usados – quaisquer pneus de que o respetivo detentor se desfazer ou tenha a intenção ou a obrigação de se desfazer e que constituam resíduos na aceção da alínea a) do artigo 3º do Decreto-Lei nº 239/97, de 9 de Setembro [DL 2], ainda que destinados a reutilização (recauchutagem);
- Pneu recauchutado – o pneu usado que é objeto de processo industrial de acordo com as especificações técnicas aplicáveis, com vista à sua reutilização, sendo de novo colocado no mercado.

Segundo o site da Michelin [SI 1], da Valorpneu [SI 2], e da revista Fapemagic [SI 3] um pneu tem sempre na sua constituição (Figura 2.1):

1. Banda de Rolamento – É a parte exterior do pneu que fica em contacto com a estrada. Os esforços a que está sujeita são muito elevados, logo tem de ter características que lhe garantam uma boa resistência à abrasão e ao desgaste.
2. 3. Lonas de Topo – São camadas formadas por cabos de aço de pequena dimensão. Estas são coladas uma sobre a outra, sendo cruzadas em direções diferentes. Isto faz com que as lonas de topo forneçam ao pneu: a resistência circunferencial, que lhe confere o especto redondo sem deformações quando o pneu está em utilização; e a resistência transversal, que serve para resistir aos esforços causados pelo piso.
4. Carcaça – É a camada mais resistente do pneu, e é, no fundo, a estrutura interna do pneu uma vez que suporta o peso do veículo em si com o ar que retém sob pressão. É esta camada a que confere as características de resistência do pneu, sendo fundamental para a estabilidade e conforto no veículo, bem como para a eficiência energética do pneu. É formada por fibras têxteis, normalmente de *nylon* ou poliéster, ou de aço.
5. Revestimento de borracha interior – Esta é uma camada sintética de borracha que se encontra no interior do pneu. Tem a particularidade de ser estanque ao ar funcionando como câmara-de-ar.
6. Parede lateral – Parte lateral da carcaça do pneu que garante a resistência lateral do mesmo. Tem elevada importância pois resiste a qualquer tipo de esforço lateral aplicado no pneu.

7. Talão – Faz a transmissão das ações do binário do motor e de travagem da jante à área de contacto com o pavimento.
8. 9. Aro de Talão – Fixa o pneu à jante, podendo resistir a esforços elevados.



Figura 2.1 - Componentes de um pneu (MICHELIN, 2005)

O maior constituinte de um pneu é a borracha, representando esta 75% em massa da constituição de um pneu de um veículo ligeiro e 80% de um pesado (Basel Convention, 1999). Para além da borracha, um pneu é constituído também por carbono, metais, têxteis, óxido de zinco, enxofre e aditivos.

2.1.2 *Impacte Ambiental*

Para entender a problemática da má gestão de pneus usados, é importante ter em conta que os pneus, como qualquer produto, têm um período de vida útil estimado em quatro anos (Decreto-Lei nº43/2004, de 2 de Março [DL 3]). A sociedade consumista atual proporcionou o aumento do uso do automóvel, o que implicitamente fez com que o consumo de pneus aumentasse drasticamente. Com um período de vida útil tão curto e com o aumento emergente de número de pneus, é natural que se pense no que fazer aos pneus inutilizados. Para abordar este tópico, é necessário por começar por se saber como é o ciclo de vida de um pneu (Pedro, 2011). Num estudo feito para a empresa Continental, (Kromer et al., 1999), o ciclo de vida de um pneu é composto por cinco estágios distintos:

- **Aquisição das matérias-primas e fabrico dos componentes dos pneus.** As matérias-primas utilizadas são matérias-primas fósseis, como o petróleo bruto, o gás natural ou o carvão, que, subsequentemente originarão a borracha, o negro de fumo e outros componentes químicos utilizados no fabrico de pneus;
- **Produção dos pneus,** a partir dos materiais já fabricados constrói-se o pneu para posterior vulcanização;
- **Utilização dos pneus;**

- **Reciclagem dos pneus**, que envolve a reutilização dos pneus usados como matéria-prima ou fonte de energia;
- **Transporte**, englobando todo o transporte de matérias-primas, materiais ou pneus ao longo do ciclo.

Embora seja classificado como ciclo, os autores consideraram que para a sua existência há que haver fatores externos que o dinamizem, fatores de entrada e de saída (funcionando como *input/output*).

Como *inputs* do sistema, são contabilizados os consumos de recursos, água e ar. Pode se concluir que as fases correspondentes ao transporte e à produção de pneus são as que envolvem menores consumos por pneu, e conseqüentemente, um menor impacte ambiental. Analisando a Quadro 2.1 pode à partida comparar-se a fase das matérias-primas com a fase de transporte, e deduzir-se que os valores dos consumos são muito díspares, algo que já não se verifica quando comparada a mesma fase com a da produção de pneus. Embora exista uma variação de 22 kg por pneu na fase de produção de pneus e 46 kg por pneu na fase de matérias-primas em termos de consumos de ar, a principal diferença entre fases reside no consumo de água. Aqui registam-se valores de 24 kg por pneu na fase de produção de pneus enquanto na fase de matérias-primas os valores são de 560 kg por pneu. Este valor de consumos de água é o maior do ciclo de vida do pneu por estar diretamente relacionado com a produção de borracha sintética e de *rayon* (fibra). Quanto à fase de utilização de pneus, esta é a que envolve um maior consumo de recursos e de ar, maioritariamente devido a esta fase requerer quantidades grandes de energia. Quando comparada à fase de matérias-primas o consumo de ar aumenta de 560 kg para 2027 kg.

Quanto aos *outputs* do sistema, são analisadas as emissões atmosféricas, emissões para a água e os resíduos provocados pelo consumo dos pneus. Ao analisar o Quadro 2.2 deduz-se facilmente que a fase que provoca maiores emissões atmosféricas é a correspondente à da utilização de pneus, tendo um valor de 567 kg por pneu. Este facto deve-se sobretudo à emissão de dióxido de carbono.

Quadro 2.1 - Consumos de recursos, ar e água (adaptado de Kromer, 1999)

Actividade	Consumos [kg/pneu]		
	Recursos	Ar	Água
Matérias-Primas	24	46	560
Transporte	0,508	5	1,3
Produção de pneus	18	22	24
Utilização de pneus	217	2027	44

Quanto às emissões para a água, a fase com mais ênfase é a da obtenção de matérias-primas com um valor associado de 1,85 kg por pneu. Este valor é muito superior aos das restantes fases, sendo estes muito pouco representativos (0,054 kg/pneu na fase de transporte, 0,00016 kg/pneu na fase de produção de pneus e 0,055 kg/pneu na fase do uso de pneus). Fazendo uma análise da produção de resíduos, nota-se que a fase da obtenção de matérias-primas e da produção de pneus são as que têm um maior impacto, com o valor da primeira superior ao da segunda.

Quadro 2.2 - Emissões de recursos, ar e água (adaptado de Kromer, 1999)

Actividade	Emissões [kg/pneu]		
	Recursos	Ar	Água
Matérias-Primas	10,8	1,85	3,2
Transporte	1,5	0,054	0,004
Produção de pneus	15	0,00016	1,2
Utilização de pneus	567	0,055	0,21

Da análise feita ao estudo, conclui-se que ao longo do ciclo de vida de um pneu, são acumulados cerca de 4,614 kg de resíduos por pneu. Isto significa que existe um efeito direto no ambiente relacionado com o uso e fabrico de pneus.

Embora os constituintes do pneu tenham um valor que se pode considerar elevado, o processo de fabrico dos pneus, mais propriamente a sua vulcanização, desvaloriza-os. Isto deve-se à vulcanização ser um processo praticamente irreversível, sendo impossível obter os componentes separados e com a sua forma original. Este fator aliado à reciclagem de pneus acarretar custos elevados, leva a que a finalidade dos pneus usados seja um problema da máxima importância (Pedro, 2011). Como tal, ao longo de muitos anos, criaram-se depósitos ao ar livre que inerentemente acarretam elevados riscos de saúde pública e em termos ambientais, entre os quais:

- Depósito em leitos de água – Para além de bloquearem a passagem da água no leito, o depósito de pneus em leitos pode levar ao seu assoreamento, que além de interferirem na sua topografia podem originar cheias.
- Depósito em aterros sanitários – Além desta prática já estar proibida na Europa através da Diretiva do Conselho 1999/31/CE, de 26 de Abril [DL 4], a deposição de pneus em aterros sanitários seria algo pouco sustentável uma vez que um pneu pode levar centenas de anos a decompor-se (Collins et al., 1994).
- Instalação em grandes depósitos – O depósito de pneus em terrenos baldios de grande extensão traduz-se num verdadeiro perigo para a saúde pública por inúmeras razões. Os terrenos são propícios à potencialidade iminente de incêndio, que, derivado dos pneus terem na sua constituição compostos de carbono e enxofre, levam a que a sua combustão não seja controlada. Por outro lado, como os terrenos são alvo da chuva, os pneus tendem a reter alguma parte desta. Este fator aliado às altas temperaturas leva à origem de mosquitos e bactérias prejudiciais à saúde pública (Nehdi, 2001).

2.1.3 Legislação em Portugal

Tendo em conta os fatores de saúde pública e ambiental referidos anteriormente, torna-se importante efetuar uma breve abordagem da legislação atual nacional em vigor que aborde a problemática da gestão de pneus usados. Como tal, destaca-se a seguinte legislação:

- Diretiva nº 2008/98/CE, do Parlamento e do Conselho, de 19 de Novembro [DL 5] – diretiva europeia sobre a gestão de resíduos, definindo resíduo como objeto que o detentor se desfaça ou tenha a intenção/obrigação de o fazer. Nela estão estabelecidas medidas de proteção do ambiente e da saúde pública.

- Decreto-lei nº 178/2006, de 5 de Setembro [DL 6] – Decreto-Lei em vigor em Portugal sobre a gestão de resíduos.

- Portaria nº 209/2004, de 3 de Março [DL 7] – tem como fim a identificação e classificação de cada tipo de resíduo, e onde os pneus são considerados resíduos não perigosos.

- Portaria nº 335/97, de 16 de Maio [DL 8] – trata o modo de como os resíduos devem ser transportados em Portugal.

- Diretiva nº 2000/53/CE, do Parlamento e do Conselho, de 18 de Setembro [DL 9] e Decreto-Lei nº 196/2003, de 23 de Agosto [DL 10] – o Decreto-Lei transpõe para o ordenamento jurídico português a Diretiva Europeia, que trata a gestão de veículos e de veículos em fim de vida, pretendo evitar a decomposição excessiva de veículos em fim de vida e promover a sua reciclagem e reutilização.

- Diretiva nº1999/31/CE, do Parlamento e do Conselho, de 26 de Abril [DL 4] e Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto [DL 11] - O Decreto-Lei transpõe para o ordenamento jurídico português a Diretiva Europeia, que trata a gestão de aterros, e tudo o que daí advém, tal como construção, exploração e encerramento.

- Decreto-lei nº 111/2001, de 6 de Abril [DL 1] – decreto-lei em vigor em Portugal onde estão estabelecidos os princípios sobre a gestão de pneus e pneus usados. Foi alterado pelo DL nº 43/2004, de 2 de Março [DL 3], DL nº178/2006, de 5 de Setembro [DL 6] e DL nº73/2011, de 17 de Junho [DL 12].

A legislação em vigor obriga então a que os pneus sejam valorizados, podendo isso ser realizado de vários modos. Os pneus podem ser: reutilizados, como é feito em divisórias de autoestradas ou em docas; reciclados, reduzindo a sua granulometria quer por processo mecânico ou criogénico; valorizados energeticamente, com utilização para combustão em cimenteiras; ou recauchutados, processo que muda parcialmente parte do pneu para voltar a ter utilização em veículos.

2.1.4 Recauchutagem de Pneus em Portugal

De acordo com o site da valorpneu, “a recauchutagem consiste em colocar um novo rasto a um pneu já utilizado”, sendo que em Portugal, esta é realizada por dois processos distintos: “a quente” ou “a frio”.

A raspagem, ou grosagem, é a parte do processo onde se remove a banda de borracha remanescente e se prepara o pneu para receber a borracha nova. A remoção pode ser feita por máquinas manuais, semiautomáticas e automáticas. As máquinas automáticas utilizam menos mão-de-obra e dão um resultado mais uniforme, isto é, a produção do pó de borracha com maior uniformidade e, consequentemente, mais

valorizável. Desta forma, elimina-se a raspagem manual, de onde resultam as tiras de borracha (resíduo pouco valorizável). Estes resíduos são recolhidos por aspiração e deposição em recipientes, após passar por sistemas de filtração por ciclone ou filtro de mangas.

Após o pneu ser raspado é aplicada cola manualmente ou com recurso a máquinas. É a partir desta fase da recauchutagem que os dois processos diferem:

- Processo a frio – É aplicado um piso pré-vulcanizado cortado à medida, sendo os pneus colocados num autoclave, para a fase da vulcanização. Estes são sujeitos a ciclos de pressão e temperatura (110°C a 130°C), que assegura a adesão do piso à carcaça;
- Processo a quente – Sobre o pneu raspado é colocado um molde com o desenho do rastro do piso, sendo, posteriormente, aplicada a borracha por extrusora. Este processo é realizado a temperaturas de 150°C a 170°C, com a conseqüente vulcanização da borracha.

Relativamente ao impacto ambiental, o processo a frio origina mais resíduos de embalagens de plástico, mais sobras de corte e mais resíduos de ligação. O processo a quente por sua vez gera mais resíduos de embalagens de madeira, menos plásticos e consome mais energia (Valorpneu, 2010)

Para se reciclar um pneu, significa que este já expirou o seu tempo de vida útil. Este acontecimento é normal uma vez que com o uso, o pneu, como qualquer material, desgasta-se. Um pneu deve sair de circulação quando:

- A altura do rastro do pneu atingir o mínimo admissível por lei (5 mm);
- Ao enviar o pneu para uma empresa de recauchutagem este for rejeitado;
- Quando os veículos onde estes se inserem forem desmantelados por estarem degradados.

De acordo com o Relatório temático sobre o resultado das inspeções a Indústrias de reconstrução de pneus da Inspeção-Geral do Ambiente e do Ordenamento do Território (IGAOT, 2007) em Portugal, em termos de produção, as 27 indústrias de recauchutagem inspecionadas, são responsáveis pela recauchutagem de cerca de 864 mil pneus anualmente. Estes valores podem ser consultados na Figura 2.2.

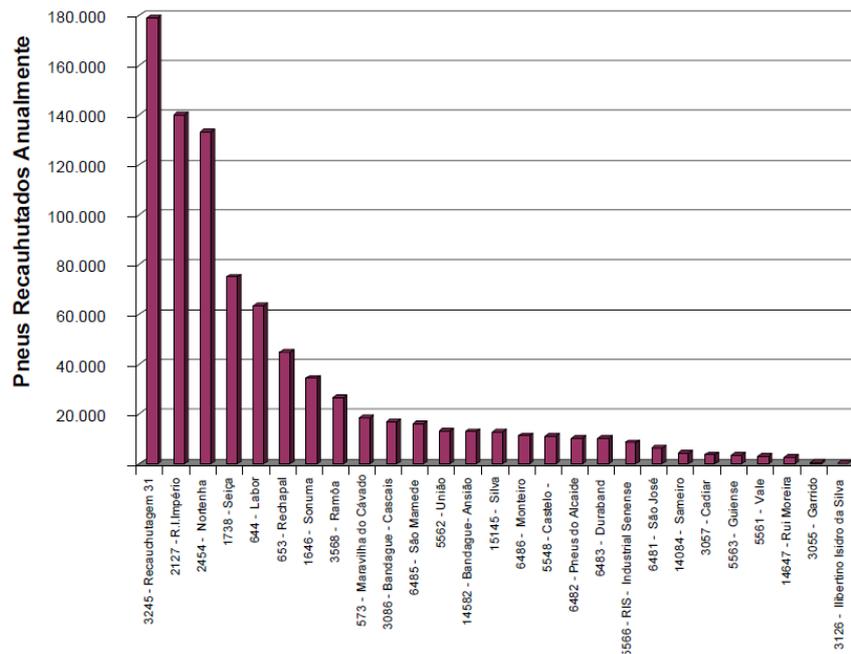


Figura 2.2 - Registo médio de pneus recauchutados (IGAOT, 2007)

A quantidade de pneus recauchutados anualmente (34% de veículos pesados e 24% de ligeiros), representa uma produção de cerca 4402 toneladas de pó de borracha e de 8093 toneladas de pneu que não tem uso. Para além destes, há também outros resíduos a referir, tais como plásticos, resíduos sólidos e urbanos, papel e cartão.

Sabe-se que a quantidade de resíduos provenientes da recauchutagem de pneus depende de fábrica para fábrica, consoante o tipo de pneus que trabalha e do processo de recauchutagem que adota. O estudo aponta que apenas 46% das 4402 toneladas de pó de borracha são utilizadas em território nacional, 8% é destinado para aterro e 1% é incinerado.

Para além disto, 4% do material não é utilizado da forma mais adequada, o que, no total, representa em média uma produção anual de cerca de 573 toneladas de pó de borracha.

As empresas de recauchutagem não têm finalidade para o resíduo, sendo este dado ou exportado praticamente sem custos. Este fator serve como motivação económica, uma vez que torna possível a obtenção do agregado a custo quase zero, visto não poderem ser decorados os custos associados ao seu transporte.

Atualmente, os resíduos provenientes da recauchutagem de pneus têm grande procura. No entanto, estas empresas querem comprar o agregado com granulometrias específicas e de preferência provenientes de um processo criogénico. Este consiste em arrefecer criogenicamente os polímeros da borracha dos pneus que as fábricas recebem por meio de azoto líquido, que, por meio de forças de alto impacto originam grânulos cuboides, lisos, com aspeto brilhante e praticamente sem poros.

As utilizações são variadas e consoante a granulometrias são utilizadas em betumes modificados para pavimentos (estradas), campos de relva sintética, pistas de atletismo, parques infantis, camas elásticas ou picadeiros e pistas de cavalos.

A empresa Unisilo - Reciclagem de Resíduos Industriais, Lda, no Cadaval, mistura o pó de pneus que mói com outros resíduos de borrachas industriais para criar componentes com aplicações na indústria de construção, como isolamento térmico, acústico e impermeabilização de pisos e pavimentos.

O processo de obtenção de pó de borracha tem, evidentemente, custos de produção e manutenção, incrementando, assim, custos adicionais ao produto final.

No entanto, todas as empresas que se encarregam de recauchutar os pneus têm uma grande produção de pó de borracha sem granulometrias regulares, tendo este resíduo um fraco escoamento e, conseqüentemente é enviado para aterro e incineração.

2.2 Características e propriedades dos elastómeros

Os materiais, consoante as suas características podem ser classificados por diferentes tipos. Uma das várias classes de materiais, como metais ou madeiras, são os elastómeros (ou borrachas). Os pneus têm propriedades que os elastómeros também têm, uma vez que na sua constituição está presente borracha. Este material é considerado macromolecular, isto é, ao ser terminada a aplicação de uma tensão que lhe tenha sido imposta, recupera rapidamente a sua forma e dimensões iniciais. Este tipo de material é caracterizado por ter um comportamento elástico após deformação em compressão ou tração. Esta propriedade pode fazer com que o elastómero aumente até dez vezes o seu comprimento inicial, com a particularidade de após remoção da tensão aplicada, é possível verificar que ele voltará à sua forma e comprimento iniciais (tendo em conta circunstâncias ideais).

Consoante a escolha do elastómero assim também serão as suas propriedades. Estas dependem muito da metodologia de obtenção e produção do elastómero em questão (Hofmann, 1989).

2.3 Argamassas com incorporação de resíduos

A emergente preocupação com a sustentabilidade ambiental levou a que cada vez mais se faça reutilização de resíduos. O ramo da construção não é exceção, sendo que já existem trabalhos com a incorporação de vários tipos de resíduos. Exemplo disso é o trabalho feito por Brás et al. (2013) com a introdução em argamassas de cimento de resíduos de cortiça, ou de André et al. (2014), realizaram trabalhos referentes à introdução de resíduos da indústria do mármore em betões

Na pesquisa feita por Reschner (2008), a trituração da borracha mecanicamente leva a que se origine um granulado com aspeto rugoso e áspero. Hutchinson et al. (1990) nos seus trabalhos, avaliaram a possibilidade da aplicação de borracha na construção. Concluíram que esta pode ser utilizada como isolante estrutural, impedindo a propagação de tensões, dado que a borracha tem a capacidade de absorver 8000 vezes mais energia que qualquer metal. Raghavan et al (1998) por sua vez, realizaram ensaios com argamassa de cimento e areia com aplicação nesta de borracha de pneu. Utilizaram-se aparas de pneu de 2 mm, sendo que foram realizados ensaios a três amostras distintas a 5, 10 e 15%, em termos de proporção com a massa de cimento. Os seus resultados apontam que as argamassas que continham borracha de pneu, em comparação às que não tinham, apresentam uma diminuição da resistência à flexão, e que era também diminuída com o aumento da quantidade de borracha na argamassa.

Como se pode verificar, a introdução de resíduos de borracha da recauchutagem de pneus em obras relacionadas com a construção não é um tema novo. Assim, realizou-se uma pesquisa bibliográfica que tem como objetivo encontrar lacunas nos trabalhos já feitos, para que se possa avançar no conhecimento dentro deste âmbito.

No Quadro 2.3 encontra-se um resumo de estudos relacionados com a inserção de resíduos de borracha em argamassas de cimento. Da sua análise, verifica-se que a maioria das argamassas são produzidas do modo usual, em misturador mecânico, com tempo de cura de 28 dias. As argamassas são feitas utilizando o resíduo de borracha como substituição do agregado (areia) em quantidades normalmente reduzidas (até um máximo de 30% ou 40%).

A borracha proveniente de fábricas de recauchutagem na grande maioria não é tratada, ou seja, é utilizada como é recebida da fábrica. Ainda assim, há dois autores (Meneguini, 2003; e Pedro, 2011) que fazem um tratamento prévio da borracha: o primeiro através da imersão da borracha em água e depois numa solução de hidróxido de sódio e o segundo através de uma lavagem superficial do agregado. Em termos de resultados, os obtidos por estes autores não apresentam melhorias face aos demais. No entanto, como a borracha nas fábricas de recauchutagem pode ser aglomerada em sacos tipo silo estando abertas e em contacto com o ar, podem ter sais nelas contidos que uma lavagem superficial pode resolver.

As dimensões de partículas utilizadas pelos autores são muito pequenas, embora haja alguns (Corinaldesi, 2011; e Lima, 2000) que utilizam partículas mais grossas. O tamanho das partículas de borracha está em tudo relacionado com o tipo de granulometria do agregado que se utiliza, porque convém aos agregados apresentarem uma granulometria semelhante para a mistura ser mais homogénea.

Os traços a serem utilizados nestas argamassas são os correntes, 1:3 e 1:5, com a particularidade que a relação de água/ligante é muito variável uma vez que a borracha é um material mais elástico que a areia, e tem de se dosear a argamassa com água suficiente para esta manter uma trabalhabilidade plausível. As condições de cura variam entre cura standard e cura húmida.

Por sua vez, no Quadro 2.3 apresenta-se um resumo de estudos em que o resíduo de borracha foi utilizado como adição em relação à massa do agregado. Aqui verifica-se que as constituições, processos de amassadura e condições de cura são muito similares aos utilizados por autores que tenham feito a substituição de agregado por resíduo de borracha. No entanto, a dimensão das partículas de borracha é muito menor. A maioria dos autores que utilizaram o resíduo como adição utilizou a fração granulométrica mais pequena, a que chamam pó ou cinza de borracha.

Os estudos sintetizados no Quadro 2.4 e no Quadro 2.5 que utilizaram o resíduo de borracha em substituição do ligante (cimento ou gesso) e outros artigos tratam resíduos que não o de borracha mas que também são interessantes do ponto de vista de entender os ensaios feitos às argamassas e de como é tratado o resíduo.

Os ensaios feitos em todos os casos são os ensaios usuais de caracterização de argamassas, quer em estado fresco como em estado endurecido: espalhamento, teor de ar, massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade estático e dinâmico, condutibilidade térmica e

isolamento acústico. Em detalhe, os resultados de alguns deles estão apresentados no Quadro 2.6 e no Quadro 2.7.

Quadro 2.3 – Quadro-resumo de estudos sobre argamassas com substituição de borracha

Argamassas							
Art.	Constituintes	Traço	Substituição (Areia/Borracha)	Dimensões Partículas Borracha	Tratamento Borracha	Preparação dos Provetes	Ensaio Experimentais
Al-Ahkras et al., 2004	Cimento Portland Tipo I, Areia, Aparas de Borracha de pneus usados	1:3:0,65 massa (c:agr:w)	0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10% (massa)	Dimensão média de 13 μ m (pó)	-	Amassadura mecânica de 3 minutos; provetes em serrapilheira molhada durante 24h, de seguida 48h em água de cal saturada	Teor de ar, compressão, flexão, gelo-degelo, resistência a iões de cloreto
Corinaldesi et al., 2011	Cimento Portland , areia, Aparas de borracha de solas de sapato, filer calcário	1:3:3 em massa (c:agr:w)	0%, 10% e 30%, optimização posterior da de 10% para 20% (volume)	\leq 12 mm	-	Provetes feitos por substituição de borracha em 10% e 30%; posteriormente fez-se em 20% com adição de filer calcário, em 1% da massa do ligante	Compressão, flexão, condutibilidade térmica
Eiras et al. 2014	Cimento Portland , areia, aparas de borracha de pneus usados e adjuvante introdutor de ar	w/c - 0.5 agr/c - 3.83 em volume	0%, 40%, 50% e 60% (volume)	1-2 mm	-	Provetes produzidas em câmara húmida, a 20°C e 95% HR durante 28 dias; o introdutor de ar em 0,125%, 0,25%, 0,5% e 0,75% em substituição à massa do cimento	Absorção de água, compressão, flexão, condutibilidade térmica, amortecimento a ultrassons e a vibrações

Quadro 2.3 - Quadro-resumo de estudos sobre argamassas com substituição de borracha (continuação)

Argamassas							
Art.	Constituintes	Traço	Substituição (Areia/Borracha)	Dimensões Partículas Borracha	Tratamento Borracha	Preparação dos Provetes	Ensaio Experimentais
Ferreira, 2009	Cimento Portland , areia, aparas de borracha de pneus usados	agr/c - 1:5 em massa	0%, 10%, 20% e 30% (massa)	0.15-4.8 mm	-	Provetes feitas em misturador mecânico, sendo retirados dos moldes 48h depois e deixados em cura submersa a 28 dias	Compressão, flexão, condutibilidade térmica, capilaridade
Gisbert, 2014	Cimento Portland , areia, aparas de borracha de pneus usados	w/c - 0.5 agr/c - 3.83 em volume	0%, 10%, 20%, 30% e 40% (massa)	0, 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 e 8 mm	-	Provetes com processo de cura com imersão em água durante um mês, secas posteriormente durante 48h em laboratório a 23°C e 32% HR	Módulo de elasticidade, compressão, flexão, amortecimento a ultrassons e a vibrações
Meneguini, 2003	Cimento Portland , aparas de borracha de pneus, areia	Três tipos, c/agr - 1:3; 1:5; 1:7 em volume	0% e 10% (massa)	≤ 1.2 mm	Solução de hidróxido de sódio durante uma hora, lavagem posterior	Provetes produzidos em misturador mecânico, retirados dos moldes 48h depois e deixados em cura submersa durante 28 dias	Compressão, flexão, capilaridade, módulo de elasticidade estático, abrasão
Pedro, 2011	Cimento Portland , aparas de borracha de pneus usadas, areia	c/agr - 1:4 em volume	0%, 5%, 10% e 15% (volume)	≤ 2 mm	Limpeza superficial	Três tipos de cura distintos, consoante o tipo de ensaio.	Compressão, flexão, capilaridade, aderência ao suporte, permeabilidade ao vapor de água

Quadro 2.3 - Quadro-resumo de estudos sobre argamassas com substituição de borracha (continuação)

Argamassas							
Art.	Constituintes	Traço	Substituição (Areia/Borracha)	Dimensões Partículas Borracha	Tratamento Borracha	Preparação dos Provetes	Ensaio Experimentais
Raghavan, 1999	Cimento Portland , aparas de borracha de pneus usados, areia	agr/c - 2.75 em massa	0% e 100% (massa)	≤ 2 mm	-	Provetes feitas em câmara húmida, a 23°C e 100% HR durante 28 dias, borracha introduzida apenas após a mistura do cimento e areia mantidas em câmara húmida	Compressão, flexão, adesão borracha-cimento, fissuração
Turatsinze, 2005	Cimento Portland , areia, aparas de borracha, plastificante, estabilizador, fibras de aço	agr/c - 3.2 w/c - 0.5 em massa	0%, 20% e 30% (volume)	≤ 4 mm	-	Provetes com plastificante para melhor trabalhabilidade e estabilizador para reduzir a segregação	Compressão, flexão, módulo de elasticidade estático e dinâmico, fendilhação
Turki, 2009	Cimento Portland, areia, aparas de borracha	agr/c - 3 w/c - 0.5(inicial) em massa	0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% (massa)	1-4 mm	-	Provetes a 20°C e HR de 100%, cujo tempo de cura foi de 28 dias	Porosimetria, compressão
Turki, 2012	Cimento Portland, areia, aparas de borracha, fíler silicioso e cálcario	agr/c - 3 w/c - 0.5 em massa	0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% (massa)	1-4 mm	-	Provetes 20°C e HR de 100%, cujo tempo de cura foi de 28 dias. Introdução de adjuvantes em substituição em 5% da massa do agregado	Porosimetria, compressão, flexão
Lima, 2000	Cimento Portland , aparas de borracha, areia	c/agr - 1:4 em volume	0% e 30% (massa)	10-30 mm	-	-	Compressão, flexão, condutibilidade térmica, isolamento acústico

Quadro 2.4 - Quadro-resumo de estudos sobre argamassas com adição de resíduo de borracha

Argamassas							
Art.	Constituintes	Traço	Adição (Areia/Borracha)	Dimensões Partículas Borracha	Tratamento Borracha	Preparação dos Provetes	Ensaio Experimentais
Meshgin, 2012	Cimento Portland , areia, aparas de borracha, fibra de madeira	c/agr - 1: 2,5/3 em massa	30% (massa)	Moagem grossa - de 2,5 a 3,5 mm Moagem fina - de 2 a 2,5 mm	-	-	Compressão, flexão, condutibilidade térmica, porosimetria
Cintra, 2014	Cimento , areia, vermiculite expandida, aparas de borracha	c/agr : 0.66 em massa	30% e 100% (massa)	Moagem grossa - de 2 a 3 mm Moagem fina - < 1 mm	-	Mistura inicial dos materiais a seco em misturador, adição da água para índice de trabalhabilidade de 250 mm	Teor de ar, retenção de água, compressão, tração
Canova, 2007	Cimento Portland , areia, Aparas de borracha	1:1,5:9 volume (c:cal:agr)	0%, 6%, 8%, 10% e 12% (massa)	Diâmetro inferior a 0,5 mm	-	Argamassa inicial de cal viva e areia produzida em betoneira, adição de cimento e pó de borracha posterior, tempo de cura a 28 dias	Teor de ar, massa volúmica, compressão, tração, módulo de elasticidade estático, absorção de água
Yue, 2010	Cimento Portland , areia, aparas de borracha, adjuvantes de adesão	agr/c - 3 w/c - 0.5 em massa	30% (massa)	2-5 mm	Borracha limpa e mergulhada em emulsão de adjuvantes	Provetes feitos em ambiente de 20°C e HR de 100%, cujo tempo de cura foi de 28 dias. De seguida, cada amostra com adjuvante distinto	Porosimetria, compressão, flexão
Segre, 1999	Cimento Portland , aparas de borracha de pneus usados, areia	c/w - 1:3 em volume	0%, 5% e 10% (massa)	≤42 mesh	Tratamento superficial com água e solução de H ₂ SO ₄ e NaOH	Provetes feitos à temperatura ambiente, e 24h depois desmoldam-se e colocam-se em estufa a 45°C e HR de 100 %	Compressão, flexão, módulo de elasticidade estático, abrasão

Quadro 2.5 - Quadro-resumo de argamassas com substituição de cimento ou gesso por resíduo de borracha, e de argamassas de cimento com substituição de areia por resíduo de EPS e cortiça

Argamassas						
Art.	Constituintes	Traço	Proporção (Areia/Borracha)	Dimensões Partículas Borracha	Preparação dos Provetes	Ensaio Experimentais
Merino, 2007	Cimento Portland , aparas de borracha, fibra de vidro CEM-FIL 62/2 de 18mm	Não referido	0%, 50% e 75% (massa)	0.4-2 mm	Primeira amostra sem borracha, adição de borracha para determinar a melhor amostra em termos de trabalhabilidade e aderência ao ligante.	Resistência à compressão, rigidez superficial, absorção de água, capilaridade
Herrero, 2012	Gesso E-35 , aparas de borracha de pneus usados	w/p - varia consoante a amostra e dosagem de borracha	0%, 30%, 40%, 50% e 60% (massa)	Três tipos de amostras: 0-0.6 mm, 0.6-2.5 mm e 2.5-4 mm	Amostras feitas segundo cada dosagem de borracha, traço de cada amostra será diferente	Compressão, módulo de elasticidade, condutibilidade térmica, isolamento acústico a sons aéreos e de percussão
Ferrandiz, 2012	Cimento Portland, areia, diferentes tipos de EPS,	c/agr/w - 1:3:0.5 em massa	Adição de EPS em 0%, 30%, 50% e 70% (volume)	EPS comercial - Resíduos de EPS - <1mm ou pó	Cura mergulhada em água, a 20 °C, sendo o tempo de cura a 7, 28 e 120 dias.	Porosimetria, compressão, flexão, absorção de água, ensaio acústico
Choi, 2004	Resíduos de EPS, cal, areia	lig/agr - 1:3 em massa	Utilização do EPS como ligante	Transformado em estireno líquido	Dissolve-se o EPS em estireno a 70 °C, sendo posteriormente misturados com os restantes materiais a 20°C e 50% de HR	Compressão, flexão, teste de período de vida útil, resistência à água quente
Brás, 2013	Cimento Portland, resíduos de cortiça, resíduos de EPS, areia	lig/agr - 1:3 em massa	Substituição da areia por EPS ou cortiça em 0%, 10%, 20%, 40%, 50%, 70% e 80%	Cortiça:0.5-2 mm EPS:granulos de 2mm	Mistura inicial de cimento e areia, adição de 90% da quantidade de água, mistura durante 3 minutos	Compressão, porosimetria, capilaridade, condutibilidade térmica
Ramos, 2014	Cimento, resíduos de cortiça, areia	lig/agr - 1:3 em massa	Substituição de cimento por partículas de cortiça em 0%, 10% e 20%	< 90 µm	-	Compressão, flexão, alcalinidade, carbonatação e ataque de sulfatos,

Quadro 2.6 - Quadro-resumo de ensaios de resistência mecânica dos estudos analisados

Art.	Resistência à Compressão			Resistência à Flexão		
	Dim. Provetes	Norma Utilizada	Resultados	Dim. Provetes	Norma Utilizada	Resultados
Corinaldesi, 2011	40x40x160 mm	EN 1015-11	Diminui com o aumento de borracha (17MPa - referência e 15 Mpa - 10%)	40x40x160 mm	EN 1015-11	Diminui com o aumento de borracha (8MPa de referencia para 7MPa para 10%)
Eiras, 2014	40x40x160 mm	EN 1015-3	Diminui com o aumento de borracha (52.1MPa de referência e 11.55MPa para 40% e 5.8MPa para 60%)	40x40x160 mm	EN 1015-3	Diminui com o aumento de borracha (10.2MPa de referência e 2.5MPa para 40%, 1.21MPa para 60%)
Ferreira, 2009	40x40x160 mm	EN 196-1-2005	Diminui com o aumento de borracha (13MPa de referencia para 7,5MPa para 30%)	40x40x600 mm	EN 196-1-2005	Diminui com o aumento de borracha (1,65MPa de referencia para 1,5 para 30%)
Gisbert, 2013	40x40x160 mm	EN 13279-2	Diminui com o aumento de borracha (51MPa de referencia para 18.58MPa a 10% e 5.01MPa a 40%)	-	-	-
Meneguini, 2003	40x40x160 mm	Não Referido	Mantém-se para os traços maiores (1:3 - 27MPa para 19MPa; 1:5 - 16MPa; 1:7 - 7MPa)	40x40x160 mm	Não Referido	Aumenta com a redução de borracha e com o aumento das fibras de vidro
Merino, 2005	40x40x160 mm	EN 1015-11	Diminui com o aumento de borracha (16MPa para 1.39MPa)	40x40x160 mm	EN 1015-11	Diminui com o aumento de borracha (3.09MPa para 1.02MPa)
Turatsinze, 2003	40x40x160 mm	Não Referido	Diminui com o aumento de borracha (de 31MPa para 11MPa)	-	-	-
Turki, 2009	40x40x160 mm	EN 196-1-1995	Diminui com o aumento de borracha (33.6MPa de referência para 25.3MPa(20%) e 7MPa (50%))	40x40x160 mm	EN 196-1-1995	Diminui com o aumento de borracha (3.1MPa de referencia para 1.91 (10%) e 1.12mpa(50%))
Turki, 2012	40x40x160 mm	GB/T 17671-1999	Diminui em todos os casos (44.6MPa de referencia para 16.56Mpa(20%) e 6.87MPa(50%))	40x40x160 mm	GB/T 17671-1999	Diminui em todos os casos (4.55Mpa de ref. Para 2.26(20%) e 1MPa(10%))
Yue, 2010	40x40x160 mm	ASTM C 208-95	Aumenta em todos os casos (15MPa para 18MPa)	40x40x160 mm	ASTM C 208-95	Aumenta em todos os casos (3.5MPa de referencia para 4.6MPa)
Ferrandiz, 2012	4x4x16 cm	EN 196-1:2005	Diminui com o aumento de EPS (de 55MPa para 49MPa (10%), 25MPa(50%) e 17MPa(70%))	4x4x16 cm	EN 196-1:2005	Diminuit com o aumento de EPS (1.87MPa para 1,35MPa (50%) e 1,11MPa (70%))
Choi, 2004	4x4x16 cm	JIS A 1184	A rondar os 100-105 MPa	4x4x16 cm	JIS A 1184	A rondar os 25 Mpa

Quadro 2.6 - Quadro-resumo de ensaios de resistência mecânica dos estudos analisados (continuação)

Art.	Resistência à Compressão			Resistência à Flexão		
	Dim. Provetes	Norma	Resultados	Dim. Provetes	Norma	Resultados
Brás, 2013	4x4x16 cm	EN 1015-11	Diminui com o aumento de cortiça (24.4MPa de ref. p/ 15.4MPa(10%), 6MPa(50%) e 5MPa (80%))	4x4x16 cm	EN 1015-11	Diminui com o aumento de cortiça (5.2MPa de ref. p/ 4.1MPa(10%), 2.9MPa(50%) e 1.8MPa (80%))
Ramos, 2014	4x4x16 cm	EN 196-1	Diminui com o aumento de cortiça (59MPa de ref. p/ 56MPa(10%) e 40.8MPa(20%))	4x4x16 cm	EN 196-1	Diminui com o aumento de cortiça (8.1MPa de ref. p/ 7.9MPa(10%) e 6.9MPa(20%))
Al-Akhras, 2002	Cubos - aresta 50 mm	ASTM C 109-02	Aumenta com o aumento de borracha (28Mpa para 42Mpa (10%))	40x40x160 mm	ASTM C 109-02	Aumenta com o aumento de borracha (3MPa para 5MPa (10%))
Canova, 2007	Cilindros - 5cm diâmetro e 10cm altura	NBR 13.279:1995 e NBR7.215:1982	Diminui com o aumento de borracha (1.29MPa de referência para 1,03MPa a 10%)	-	-	-
Segre, 1999	Cilindros - 5cm diâmetro e 10cm altura	NBR 5739	Diminui com o aumento de borracha	23x9x4	NBR 12142/91	Aumenta em relação ao de referência, sendo que diminui com a percentagem de borracha
Herrero, 2012	Cilindros - 5cm diâmetro e 10cm altura	NBR 7215	Diminui nos traços 1:3 e 1:5, sendo que em 1:7 mantém em relação ao de referência	Cilindros - 5cm diâmetro e 10cm altura	NBR 7272	Aumenta no traço 1:3, e mantém em 1:5 e 1:7 em relação ao de referência
Cintra, 2014	Cilindros - 5cm diâmetro e 10cm altura	ABNT MB-1	Diminui com o aumento de borracha	49x10x9 mm	ASTM D790-90	Diminui com o aumento de borracha
Meshgin, 2012	Cilindros - 5cm diâmetro e 10cm altura	ASTM C873-04	Diminui com o aumento de borracha (Moagem grossa 7,55MPa; Moagem fina 6,93MPa; Maior dosagem de Moagem grossa 4.28 Mpa)	Cilindros - 5cm diâmetro e 10cm altura	ASTM C293-08	Diminui com o aumento de borracha (Moagem grossa 3,6MPa; Moagem fina 3,4MPa; Maior dosagem de Moagem grossa 3,1 Mpa)
Pedro, 2011	Cilindros - 75mm diâmetro e 150mm altura	ASTM C39	Diminui com o aumento de borracha (4,94MPa para 2,57MPa (15%))	25x25x279 mm	ASTM C78	Diminui com o aumento de borracha (1.68MPa para 1.21Mpa (15%))
Raghavan, 2000	Cilindros - 11.8mm diâmetro e 23.6mm altura	NF P 18-406	Diminui com o aumento de borracha (33MPa para 12Mpa(20%))	500x100x100 mm	NF P 18-406	Diminui com o aumento de borracha (6.5MPa para 4MPa (20%))

Quadro 2.7 - Quadro-resumo de ensaios de condutibilidade térmica e isolamento acústico de diferentes autores

Art.	Condutibilidade térmica			Isolamento Acústico		
	Dim. Provetes	Norma Utilizada	Resultados	Dim. Provetes	Norma Utilizada	Resultados
Corinaldesi, 2010	Cilíndricos - 200mm diâmetro e 20mm de altura	UNI 7745	λ diminui com a adição de borracha		-	
Eiras, 2014	150x150x20 mm	EN ISO 6946:2007	λ diminui com a adição de borracha		-	
Segre, 1999	16x11x4 cm	Não Referido	λ diminui com a adição de borracha		-	
Gisbert, 2013	25x25x2 e 25x25x3 cm	Não Referido	λ diminui com a adição de borracha	25x25x2 e 25x25x3 cm	Não Referido	Valores de isolamento aumentam com o aumento de partículas finas
Meshgin, 2012	-	Não Referido	λ diminui com maior quantidade de borracha e menor dimensão das partículas		-	
Ferrandiz, 2012		-		Cilíndricos - 34.5 mm de diâmetro e 40 mm de altura	ISO 20534	Pouca variação no índice de absorção sonora
Brás, 2013	Cilíndricos -6cm diâmetro e 4cm de altura	EN ISO 10211-1	λ diminui com maior quantidade de cortiça, sendo este decréscimo mais acentuado do que com EPS		-	

Analisando o Quadro 2.4 constata-se que em termos de resistência à compressão ocorre uma diminuição significativa. Para os casos de Turki, (2009), Yue, (2010) e Ferrándiz, (2012), a diminuição chega aos 50%. No entanto, a situação é explicada pela quantidade elevada de borracha que estes autores utilizaram nos seus trabalhos. Os valores de resistência à tração também sofrem uma descida considerável. Uma vez que a borracha é muito elástica, este tipo de comportamento em argamassas já era o esperado. Porém, os resultados relativos ao módulo de elasticidade dinâmico informam que as argamassas com este resíduo são mais deformáveis. Em termos de condutibilidade térmica, a borracha é um material que é bom isolante de calor, visto que os valores reduzem face a argamassas sem este tipo de resíduo.

Com a pesquisa bibliográfica feita, deduz-se que a introdução de resíduos de borracha em produtos que possam ser utilizados na construção é uma mais-valia. Além de reduzir custos, dado que o resíduo é adquirido a custo zero, as argamassas com a presença deste resíduo apresentam melhorias em termos de deformabilidade e condutibilidade térmica. Embora existam algumas diferenças em termos de resistência, esta situação pode não ser uma agravante uma vez que, devido à compatibilidade com o suporte, para suportes menos resistentes podem ser aplicáveis.

Embora haja muitos trabalhos feitos sobre a inserção de resíduos de borracha em betões, argamassas de cimento e pavimentos, não foram feitos trabalhos com a inclusão deste material em argamassas de cal hidráulica NHL3,5. Assim, de encontro a esta lacuna encontrada na pesquisa bibliográfica, o presente trabalho foi orientado no sentido de incorporar o resíduo de borracha em argamassas desta cal. Este tipo de argamassa pode ter grande aplicação na reabilitação de rebocos de edifícios antigos, pode ser uma mais-valia com este tipo de resíduo que a poderão tornar mais deformável.

É de salientar que a realização da campanha experimental resulta de lacunas que se encontraram na pesquisa bibliográfica previamente realizada, na medida que se pretende avaliar a viabilidade da inserção de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus em argamassas de cal hidráulica natural.

3 Procedimentos da Campanha Experimental

3.1 Introdução

O presente capítulo tem como objetivo a clara descrição da campanha experimental realizada para o trabalho. Este terá em conta toda a informação relativa a formulação das argamassas, procedimentos experimentais para a sua produção, os ensaios realizados às matérias-primas, e os ensaios feitos às argamassas quer no estado fresco como no endurecido.

No que toca aos materiais utilizados para a confeção das argamassas, foram feitos ensaios aos agregados e ao ligante, de forma a garantir rigor ao estudo. A água utilizada foi uma matéria-prima que não foi sujeita a qualquer tipo de ensaio, pois esta é proveniente da rede pública de abastecimento de água, já estando assim garantida a sua potabilidade.

Note-se que os ensaios efetuados são feitos tendo por base um conjunto de normas e especificações em já existentes e em vigor. A sua utilização serve para garantir o bom rigor e uniformidade com outros ensaios já existentes e os seus respetivos resultados. Sem a sua utilização, a comparação de resultados seria limitada.

3.2 Planificação da Campanha Experimental

A campanha experimental teve lugar nos laboratórios de construção do DEC-FCT/UNL. O procedimento feito durante a mesma teve por base três fases distintas. Era imperativo tomar a ordem seguidamente descrita, uma vez que uma fase não pode acontecer sem que a que lhe anteceda esteja completa. A primeira fase consistiu na análise dos agregados e do ligante, a segunda fase resumiu-se à produção das argamassas e provetes, e a terceira aos ensaios no estado fresco e de durabilidade às argamassas produzidas.

Primeira fase – Caracterização dos constituintes das argamassas

Esta fase passa pela análise dos agregados e ligante a incorporar nas argamassas, não só em termos de ensaios efetuados a estes, mas também na aproximação de granulometrias dos dois agregados utilizados para a fase seguinte. Uma vez que o resíduo de borracha é de granulometria desconhecida, há que realizar análise granulométricas à amostra para a determinar e, posteriormente, escolher a gama de granulometria a utilizar nas argamassas.

Segunda fase – Produção das argamassas

A produção das argamassas não pode ser realizada sem a fase anterior estar completa. Após peneiração, os resíduos de borracha foram divididos em três grupos distintos: agregado “fino” (grupo **Fr**), agregado “médio” (grupo **Mr**), e agregado “grosso” (grupo **Cr**). Para o agregado de referência (a areia), utilizou-se uma mistura de quatro tipos de areia diferentes.

A amassadura das argamassas foi realizada, sendo a borracha introduzida na argamassa como adição face à percentagem de massa do agregado.

Em particular, foram formuladas sete composições de argamassas: tendo como base uma argamassa de cal hidráulica natural, a de referência, formularam-se outras com uma mistura dos vários grupos de borracha (mix) adicionada em 2,5%, 5% e 7,5% da massa do agregado ou de 18%, 36% e 54% em relação à massa do ligante. Posteriormente, realizou-se a amassadura de argamassas de cal hidráulica com resíduos de borracha em adição da massa do agregado em 5%, mas para cada fração granulométrica separada do resíduo (**Fr**, **Mr** e **Cr**).

Foram realizados ensaios às argamassas no estado fresco, entre os quais espalhamento, massa volúmica, retenção de água e teor de ar. Além disso, foram também produzidos provetes prismáticos e cilíndricos. Estes mantiveram-se em condições de cura standard.

Terceira fase – Ensaios de durabilidade das argamassas

Ao completar o tempo de cura estipulado para as argamassas, 28 dias, os provetes foram alvo de ensaios de durabilidade para avaliar a possibilidade de utilização de resíduos de borracha em argamassas, quando comparadas a argamassas usuais. Foram realizados ensaios no estado endurecido (módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem, condutibilidade térmica, massa volúmica aparente, porosidade aberta, permeabilidade ao vapor de água e porosimetria de mercúrio).

3.3 Constituintes das Argamassas

A realização das argamassas foi feita ao traço volumétrico de 1:3, e foi utilizado como ligante cal hidráulica natural NHL 3,5, como agregado uma mistura de quatro areias siliciosas de diferente granulometria e resíduos borracha da recauchutagem de pneu, e água.

Cal Hidráulica Natural

Na elaboração das argamassas desenvolvidas neste trabalho foi utilizado como ligante a cal hidráulica natural NHL 3,5 (Figura 3.1), fabricada pela Secil Martingança, classificada segundo a norma NP EN 459-1:2011 (IPQ, 2011). Note-se que a utilização desta matéria-prima teve as devidas precauções, na medida que quando utilizada houve sempre o cuidado de deixar o saco de cal bem selado, evitando assim o contacto com outros materiais potenciais à mudança das suas características base.



Figura 3.1 - Cal hidráulica natural NHL 3.5 utilizada na confecção das argamassas

Areias

O agregado utilizado na dosagem das argamassas foi uma mistura de quatro tipos de areias cuja granulometria difere entre si, como mostra a Figura 3.2. As areias utilizadas, foram as APAS 12 (areia cuja granulometria é grossa), APAS 20 (areia cuja granulometria é média), APAS 30 (areia cuja granulometria é fina) e APAS 120 (areia cuja granulometria é muito fina). A sua utilização foi feita estando estas no estado seco. As dosagens para a mistura foram previamente definidas, de acordo com as suas granulometrias e do ligante. Isto serviu para se conseguir uma aproximação a uma mistura de areias com uma granulometria extensa. Em todas as amassaduras efetuadas, a massa de mistura de areia utilizada foi sempre a mesma.



Figura 3.2 - Quatro tipos de areia utilizados na confeção das argamassas

Resíduos de Borracha

Os resíduos de borracha foram utilizados na dosagem de argamassa como adição parcial da massa de areia. Estes foram obtidos pela empresa portuguesa de recauchutagem *BANDAGUE, S.A.*. Aquando o processo de recauchutagem, existem sobras da extração da banda de rodagem, que são recolhidas e guardadas em sacos do tipo silo. Atualmente, a sua utilização é praticamente nula, sendo que a empresa as exporta a preço praticamente nulo. O produto foi entregue em mão diretamente da fábrica, sem tratamento prévio.

Água

A água utilizada nas amassaduras foi água obtida diretamente da rede pública de abastecimento de água. A quantidade necessária em cada amassadura foi determinada durante este processo, uma vez que, por falta de dados de outros trabalhos referentes a esta quantidade, não era possível *à priori* saber efetivamente esses valores. Desta forma, consoante a trabalhabilidade de cada amassadura, assim foi definida a quantidade de água utilizada.

3.4 Primeira Fase: Caracterização dos Constituintes das Argamassas

Para uma expedita compreensão dos trabalhos realizados, é importante uma primeira caracterização e consequente análise dos constituintes da argamassa. A cada um destes foram realizados ensaios de análise granulométrica e de baridade. A sua realização é imperativa, uma vez que a granulometria dos resíduos de borracha tem de ser adaptada à granulometria das areias, enquanto a determinação da baridade ajudará na quantificação das quantidades de resíduo de borracha a inserir nas argamassas, bem como as quantidades de cal hidráulica e areia.

3.4.1 *Análise granulométrica*

Uma vez que as partículas sedimentares apresentam dimensões muito variáveis na natureza, é essencial quantificar a quantidade de cada gama de valores que os agregados apresentam. Assim, o objetivo da análise granulométrica é o traçado de uma curva granulométrica que permite analisar as diferentes granulometrias do material em estudo, e a comparação dos valores de massa de cada dimensão em relação à massa total da amostra. Por outras palavras, a realização deste ensaio viabiliza a avaliação da distribuição das percentagens da dimensão das partículas de um material por uma gama de valores. O ensaio permite ainda tirar conclusões quer em termos de proporções, quer em termos da compacidade do conjunto.

Existem vários métodos de análise granulométrica, entre os quais o método da peneiração, o método da sedimentação ou o da análise por levigação. No presente trabalho foi efetuado apenas o método da peneiração. A realização deste ensaio baseou-se na norma NP EN 933-1:2012 (IPQ 2012), e este efetua-se através da passagem da amostra por uma série de peneiros que estão concebidos a poderem ser encaixados uns nos outros e que contém uma rede de inox com aberturas. Estes formam uma coluna com a característica que um certo peneiro tem uma dimensão da sua malha inferior ao que lhe sobrepõe. Foi utilizado uma série de peneiros normalizados com granulometria conhecida, e um agitador mecânico de peneiros, como identificado na Figura 3.3. É de salientar que, tanto a areia como os resíduos de borracha, precedentemente à realização da análise granulométrica, foram submetidos ao método de esquarteramento. O método serve para, a partir de uma amostra vasta como a disponível, ser possível a obtenção de uma amostra significativa. Com recurso a um separador (instrumento que tem um número par de aberturas, estando estas viradas para cada um dos lados, que possibilita a passagem de material de modo equitativo), a amostra toda é espalhada na mesa e dividida em quatro partes iguais. Destas são retiradas duas opostas, e o restante material é misturado. Este procedimento repete-se quantas vezes as necessárias para a obtenção de uma amostra significativa e representativa.

Obtida a amostra significativa, esta deve ser pesada antes de se dar início ao ensaio, sendo de seguida feita passar pela série de peneiros. Após colocação no agitador mecânico, este é ligado durante um espaço de tempo de dez a quinze minutos. Por fim, pesam-se as quantidades de material retida em cada peneiro.



Figura 3.3 - Misturador mecânico e peneiros utilizados na análise granulométrica

3.4.2 Baridade

A baridade é uma propriedade dos materiais, que se define pela massa do material granular por unidade de volume aparente. Esta propriedade é definida pela constituição do material, mais especificamente pela sua granulometria, geometria e grau de compactação.

A mistura de matérias-primas para o fabrico de argamassas obedece a regras de quantidades, isto é, há sempre um traço, em massa ou volumétrico, que mostra a relação da quantidade de ligante em relação à de agregado (podendo também relacionar-se com a quantidade de água introduzida). Torna-se expedito que o objetivo do ensaio seja a determinação da baridade de cada tipo de material para ser possível a compatibilização de quantidades. Esta compatibilização de quantidades é, por outras palavras, a tradução do traço volumétrico adotado num traço ponderal, sendo assim viável a obtenção das dosagens exatas para a amassadura.

O ensaio para obtenção da baridade de um material é um ensaio simples, que passa pela determinação da massa de um material seco que preenche por completo um recipiente com volume conhecido. Note-se que a realização do ensaio foi baseada na norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ, 2002).

Primeiramente, a amostra foi colocada em estufa até serem garantidos valores de massa constante.

De seguida, há que determinar o volume do recipiente no qual se vai realizar o ensaio. Este recipiente, com massa m_1 , enche-se com água, a temperatura medida, t_1 , sendo de seguida coberto por uma placa de acrílico com massa conhecida m_2 . É de salientar que há que garantir que na interface entre a placa de acrílico e a superfície de água não haja bolhas de ar. Mede-se por fim a massa do conjunto, m_3 , donde o volume do recipiente será traduzido pela equação 3.1;

$$V = \frac{[m_3 - (m_1 + m_2)]}{\rho} \quad (\text{equação 3.1})$$

onde:

V [dm³] – Volume do recipiente; m_1 [g] – Massa do recipiente; m_2 [g] – Massa da placa de acrílico; m_3 [g] – Massa do conjunto formado pelo recipiente cheio de água e a placa de acrílico; ρ [kg/dm³] – Massa volúmica da água à temperatura t_1 .

Com o conhecimento do volume do recipiente, pode-se dar início agora ao ensaio de baridade. O recipiente vazio foi colocado por baixo de um funil cónico, garantindo-se uma distância mínima de cinco centímetros entre o funil e o recipiente. O funil está inicialmente tapado, não permitindo que o material a ser ensaiado passe. Ao desobstruir o funil, o recipiente ficará preenchido de material. Deve-se rasar o recipiente, com o cuidado de não comprimir a amostra, medindo-se por fim a massa total deste conjunto, m_4 . Finalmente, determina-se a baridade através do quociente entre a massa de material que preenche o recipiente e o seu volume, como expresso na equação 3.2;

$$Ba = \frac{m_4 - m_1}{V} \quad (\text{equação 3.2})$$

onde:

Ba [kg/dm³] – Baridade; V [dm³] – Volume do recipiente; m_1 [g] – Massa do recipiente; m_4 [g] – Massa do recipiente preenchido com o material ensaiado.

3.5 Segunda Fase: Produção das Argamassas e Provetes

Uma vez já analisados os agregados constituintes das argamassas, a próxima fase da campanha experimental passa pela produção das argamassas. Esta fase contempla o processo de amassadura das argamassas, os ensaios realizados à argamassa no estado fresco, a produção e processo de cura dos provetes para os ensaios em estado endurecido.

3.5.1 Amassadura

Na ordem de ideias que se assumiu ao longo do trabalho, a utilização dos resíduos de borracha é vista como uma ideia sustentável na construção. Está adjacente também a ideia de minimização dos custos de produção das argamassas, uma vez que este resíduo, adquirido a custo zero, servirá como adição face à areia. Por sua vez, caso a sua utilização seja muito específica, isto é, necessite de gastos de mão-de-obra para a realização de muitas peneirações, a redução de custos não será uma vantagem. Assim, o mais expectável de acontecer em fábricas de argamassas pré-doseadas é a realização de uma peneiração, e, a partir daí, juntar as quantidades de matérias-primas desejadas. Para satisfazer esta condição, foi necessário quantificar o agregado de borracha e agrupá-lo em três grupos distintos que tenham uma gama granulométrica plausível. Além do mais a preparação das quantidades de agregados teve também o cuidado de tentar adaptar a granulometria da borracha à da areia. Separou-se então o resíduo em diferentes grupos, um de granulometria fina (grupo **Fr**) com partículas de dimensão inferior a 0,212 mm, um de granulometria média (grupo **Mr**) com partículas de dimensão entre os 0,212 mm e os 0,6 mm, e um de granulometria grossa (grupo **Cr**), com partículas entre os 0,6 mm e os 2,36 mm. Os três grupos podem ser observados na Figura 3.4. Analisou-se a percentagem de cada um destes grupos em termos de amostra global, e verificou-

se que existe uma maior quantidade de resíduo pertencente a **Cr**, a rondar os 71%. Sucede a este **Mr**, com a quantidade a representar 22% do total, e por fim **Fr** a rondar os 1,5%. Note-se que o material com granulometria superior à de **Cr** foi rejeitado na elaboração dos trabalhos. Como tal, a quantidade referente a este material (5% da amostra total), foi remetida para **Mr**, por **Fr** ser um material de granulometria muito fina e de existir em menos quantidade no conjunto, e, por **Cr** já ter uma percentagem elevada de material. Identificaram-se as três diferentes frações granulométricas formadas (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Três grupos de diferentes frações granulométricas de resíduo de borracha utilizada na confeção das argamassas (Fr, Mr e Cr)

Quanto à quantidade de borracha a integrar a argamassa, e em concordância com a pesquisa bibliográfica, foi previsto que a adição de borracha seria inferior a 10% da massa do agregado. Em laboratório, juntaram-se as quantidades necessárias em massa de areia e de borracha, com esta última a corresponder a 5% da massa de areia, e verificou-se que a quantidade de resíduo a inserir não poderia ser muito superior ao valor utilizado uma vez que assim existiria borracha em demasiadas quantidades (Figura 3.5). Isto levaria a que não fosse possível ao ligante e aos agregados terem uma ligação coesa. Foi então decidido a execução de argamassas, para além dos 5% de resíduo já definido, com 2,5% e 7,5% de adição de resíduo.

As quantidades de areia e ligante, em massa, foram sempre as mesmas utilizadas em todas as amassaduras. Por sua vez, a quantidade de água varia de amassadura para amassadura, com o intuito de garantir a trabalhabilidade desejada à argamassa. No Quadro 3.1 indicam-se as designações, quantidades em massa e composições utilizadas para as diferentes amassaduras, bem como a percentagem em massa de adição do resíduo de borracha. A argamassa sem resíduo de borracha é designada por Ref, as argamassas com diferentes percentagens da mistura de resíduo são designadas por Mix_2.5/5/7.5 consoante a percentagem utilizada, e as argamassas com uma fração de resíduo são designadas por Cr, Mr ou Fr identificando a fração, acrescido de 5 correspondente à percentagem de resíduo utilizada.

Quadro 3.1 - Quantidades de massa dos materiais utilizados para a confeção das argamassas

Argamassa	Areia (g)				Resíduo de Borracha (g)			NHL 3,5 (g)	Água (g)
	APAS 12	APAS 20	APAS 30	APAS 120	Fr	Mr	Cr		
Ref	1.28	0.72	1.16	0.84	-	-	-	0.558	0.65
MIXr_2.5	1.28	0.72	1.16	0.84	0.0015	0.0275	0.071	0.558	0.7
MIXr_5	1.28	0.72	1.16	0.84	0.003	0.055	0.142	0.558	0.74
MIXr_7.5	1.28	0.72	1.16	0.84	0.0045	0.0825	0.213	0.558	0.76
Cr_5	1.28	0.72	1.16	0.84	-	-	0.2	0.558	0.75
Mr_5	1.28	0.72	1.16	0.84	-	0.2	-	0.558	0.72
Fr_5	1.28	0.72	1.16	0.84	0.2	-	-	0.558	0.82

Os procedimentos seguidamente descritos tiveram por base a norma EN 1015-2, iniciando-se o processo da amassadura das argamassas com a pesagem dos seus constituintes, agregados e ligante numa balança de precisão 0,1g. Estes, precedentemente à sua entrada na cuba misturadora, são homogeneizados manualmente com recurso a uma pá de pedreiro. A mistura é introduzida na cuba misturadora, sendo esta posta a funcionar a uma velocidade muito reduzida. A partir do momento que a misturadora se liga, é adicionada água, com recurso a uma proveta graduada, até a argamassa obter a trabalhabilidade e consistência consideradas ideais. O processo levou dois minutos e meio, numa primeira fase, até que se suspende o processo por 30 segundos para raspar os bordos da cuba e da pá misturadora de modo a homogeneizar a argamassa. De seguida liga-se a misturadora durante mais 30 segundos, estando assim concluindo o processo de amassadura. Na Figura 3.5 está identificada a cuba misturadora e a argamassa no estado fresco.



Figura 3.5 - Agregados constituintes da argamassa no estado seco (em cima à esq.); cuba misturadora (em cima à dir.); homogeneização da argamassa fresca (em baixo)

3.5.2 Ensaio no estado fresco

Imediatamente após à obtenção da argamassa com a trabalhabilidade desejada, dá-se início a realização dos ensaios no estado fresco.

3.5.2.1 Ensaio de consistência por espalhamento

O ensaio tem por objetivo a avaliação da consistência e trabalhabilidade da argamassa, medindo o espalhamento que esta produz, tendo por base a norma EN 1015-3:1999 (CEN, 1999). Consiste em colocar uma porção de argamassa no molde de espalhamento centrado na mesa de espalhamento. Note-se que estes foram humedecidos antes da colocação da argamassa. Com o auxílio de uma colher de pedreiro introduz-se a argamassa a ensaiar até meio do molde e, por intermédio de um pilão, bate-se a argamassa em toda a sua superfície para eliminar eventuais vazios originados pela colocação da argamassa no molde. Enche-se o restante espaço do molde com argamassa voltando a introduzir-se o pilão e rasa-se a superfície. Retira-se o molde cónico lentamente e fazem-se 15 pancadas recorrendo à manivela da mesa de espalhamento e mede-se, com recurso a uma craveira e uma régua, o espalhamento ocorrido em duas direções distintas, no mínimo, como mostra a Figura 3.6.



Figura 3.6 - Ensaio de espalhamento da argamassa antes e após as 15 pancadas da mesa de espalhamento

3.5.2.2 Consistência por penetrómetro

O ensaio de consistência por penetrómetro é feito com base na norma EN 1015-4 (CEN, 1998), sendo necessário para a sua realização um penetrómetro. Este equipamento é constituído por uma haste vertical, cujo extremo inferior tem fixo um êmbolo com determinada massa.

Colocou-se argamassa fresca até metade de um recipiente normalizado, sendo esta compactada por meio de um pilão. De seguida preenche-se o resto do recipiente, volta a fazer-se a compactação da argamassa e rasa-se a sua superfície. Posiciona-se o recipiente já rasado na base do penetrómetro, deixa-se cair o êmbolo sobre a argamassa fresca e mede-se a profundidade de penetração na escala vertical da haste. O equipamento pode ser observado na Figura 3.7



Figura 3.7 - Ensaio de consistência por penetrómetro da argamassa

3.5.2.3 Ensaio de retenção de água

O objetivo principal do ensaio é a determinação da quantidade de água que a argamassa consegue reter no estado fresco, após parte dela ter sido absorvida pelo suporte. Convém à argamassa não ter uma secagem muito rápida aquando da sua aplicação de modo a evitar sofrer grandes retrações que possam ser prejudiciais ao desempenho ótimo dos constituintes da argamassa.

O ensaio foi realizado de acordo com a ficha de ensaio FE 32 DEC (UNL, 2000) e na norma prEN 1015-8 (CEN, 1999). Para a sua realização é necessário um molde metálico com 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura, um cronómetro, uma placa de vidro de secção quadrada, um peso de 2 kg e folhas circulares de filtro.

Antecedentemente à realização do ensaio pesa-se, numa balança de precisão de 0,001g, o molde e as folhas de filtro. Seguidamente, enche-se o molde até metade com argamassa fresca e compacta-se por oscilação, levantando e deixando cair em várias direções. O molde é depois cheio, oscilado novamente para compactação da argamassa, rasado, por meio de uma régua metálica, e limpo. O conjunto é então pesado sendo de seguida coberto por gaze de algodão sobre a qual são colocadas folhas de filtro, como mostra a Figura 3.7. Coloca-se uma placa de vidro quadrada por cima do conjunto e inverteu-se sobre uma superfície plana. Sobre isto é aplicado um peso de 2 kg e contabilizaram-se 5 minutos. Findo este tempo o peso é retirado, faz-se o molde regressar à posição inicial e voltam a realizar-se pesagens às folhas de filtro, como se pode observar na Figura 3.8.

Para determinar a retenção de água da argamassa há-que primeiramente saber a massa de água que está presente na porção de argamassa colocada no molde. A equação 3.3 mostra o cálculo dessa massa de água;

$$m_a = \frac{a_g \times (m_c - m_v)}{\sum_i^n c_i + a_g} \quad (\text{equação 3.3})$$

onde:

m_a [g] – Massa de água que constitui a argamassa colocada no molde; m_c [g] - Massa do molde metálico preenchido por argamassa; m_v [g] – Massa do molde metálico vazio; a_g [g] - Massa de água usada na amassadura; c_i [g] – Massa de cada um dos restantes constituintes da argamassa.



Figura 3.8 - Ensaio de retenção de água da argamassa

Por sua vez, a retenção de água é calculada através da equação 3.4;

$$R = \frac{m_a - (m_h - m_f)}{m_a} \quad (\text{equação 3.4})$$

onde:

R [%] – Retenção de água; m_h [g] – Massa das folhas de filtro no final do ensaio; m_f [g] – Massa das folhas de filtro no início do ensaio.

3.5.2.4 Ensaio de massa volúmica

Este ensaio tem como objetivo a determinação da massa volúmica no estado fresco, tendo por base a norma EN 1015-6 (CEN, 1998). O ensaio realiza-se com recurso a um molde cilíndrico de volume e massa conhecidos. Enche-se o recipiente de argamassa faseadamente, de modo a impedir a ocorrência de vazios, sendo compactado por oscilação. Pesa-se numa balança de precisão de 0,1g, e, com a massa e volume conhecidos faz-se o quociente destes.

3.5.2.5 Teor de ar

A realização deste ensaio teve como base a norma EN 1015-7 (CEN, 1998) e é feito, ao mesmo provete, após a realização do ensaio de massa volúmica. O ensaio é feito com recurso a um equipamento próprio para a medição do teor de ar, pelo método da pressão que considera que o volume ocupado pela água na argamassa corresponde ao seu teor de ar. Após o recipiente ter sido limpo é colocado no equipamento, sendo este último fixo ao recipiente lateralmente por uns grampos. O equipamento tem duas válvulas, e nesta altura do ensaio, introduz-se água com um esguicho numa delas até que saia pela outra, de modo a colmatar o espaço que está entre a superfície da argamassa. De seguido é introduzido ar no equipamento até o manómetro estabilizar, ajustando-o para o zero. Finalmente, fecharam-se as duas válvulas

e pressiona-se a válvula de escape até o ponteiro estabilizar. A percentagem de teor de ar é lida no manómetro.

3.5.3 Produção dos provetes

Com a amassadura e os respetivos ensaios no estado fresco terminados, executaram-se provetes prismáticos para a continuação da campanha experimental. Este processo consiste na colocação de argamassa em moldes metálicos, previamente montados e untados com óleo descofrante em todas as suas faces, de modo a facilitar o processo de desmoldagem. Com cada molde metálico produzem-se três moldes prismáticos, de dimensões 40x40x160 [mm]. A inserção da argamassa nos moldes é feita quando estes estão fixados num compactador mecânico, e é um processo faseado. Ao colocar-se a primeira camada, efetuam-se 20 pancadas no compactador, sendo o processo análogo à próxima camada. Retira-se o molde do compactador e, com auxílio de uma talocha, rasa-se a superfície dos moldes, para poder dar-se início ao processo de cura. Foram ainda realizados três provetes circulares para cada tipo de amassadura, com 90 milímetros de diâmetro e 20 milímetros de altura, em moldes de PVC. Os moldes podem ser observados na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Produção dos provetes prismáticos e cilíndricos da argamassa

3.5.4 Condições de cura

A cura de todos os provetes foi a denominada cura *standard*, realizada segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999). Posteriormente à moldagem dos provetes, os moldes são introduzidos em sacos de polietileno. A desmoldagem ocorre passado dois dias da amassadura, embora os provetes permaneçam nos sacos por mais cinco dias. Após os sete dias de cura em sacos de polietileno, os provetes são levados para a sala de ambiente controlado, onde são garantidas condições de temperatura e humidade relativa praticamente constantes. A sala encontra-se a uma temperatura de 20 ± 3 °C e com uma humidade relativa de 65 ± 5 %, permanecendo aí os provetes durante 21 dias para perfazer os 28 dias de tempo de cura.

3.6 Terceira Fase: Ensaio Mecânicos e de Durabilidade das Argamassas

Passados 28 dias após o processo de amassadura, procedeu-se à realização dos ensaios às argamassas no estado endurecido. Antecedentemente à realização de qualquer ensaio, os provetes, devidamente identificados por cada tipo de amassadura, foram pesados e medidos.

A sequência de ensaios iniciou-se pelos ensaios de massa volúmica por método geométrico e da determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Este facto deve-se ao facto dos ensaios não serem destrutivos e necessitarem dos provetes inteiros. Uma vez que os ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão são ensaios destrutivos, estes são os seguintes. Por sua vez, metade dos provetes resultantes do ensaio de tração por flexão (dois pedaços praticamente iguais), foram utilizados nos seguintes ensaios: uma das metades foi utilizada para o ensaio de resistência à compressão, que por sua vez origina provetes suficientemente capazes para a realização do ensaio de porosidade aberta; outra metade foi retificada em altura, com recurso a serrote, e utilizada nos ensaios de capilaridade e secagem.

3.6.1 Módulo de elasticidade dinâmico

A obtenção do módulo de elasticidade das argamassas é importante, na medida que avalia a deformabilidade da argamassa e, implicitamente, a compatibilidade com o suporte. O ensaio de obtenção do módulo de elasticidade dinâmico teve como base a norma NP EN 14146 (IPQ, 2006). O funcionamento do ensaio passa pela emissão e receção, tendo como mediador um aparelho próprio, de uma frequência fundamental de ressonância longitudinal do material, que possa ser traduzida em termos de rigidez. Embora a norma seja para aplicação em pedra natural, esta preconiza procedimentos para os quais se pode determinar a frequência fundamental de ressonância de um material.

Dado isto, recorrendo ao equipamento “ZEUS Resonance Meter” identificado na Figura 3.10, e a um programa de cálculo associado, que traduz as frequências de ressonância longitudinal, obtidas da emissão de vibrações, em valores de módulo de elasticidade consoante as características do provete (introduz-se no programa massa e dimensões do provete), determinaram-se os módulos de elasticidade.



Figura 3.10 - Equipamento "Zeus Resonance Meter"

O software associado ao equipamento *ZEUS* calcula automaticamente o valor do módulo de elasticidade associado ao provete segundo a posição deste, e de acordo com as dimensões e massa introduzidas no programa. Este procedimento automático é feito pelo software através da equação 3.5;

$$E_d = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad (\text{equação 3.5})$$

onde:

E_d [N/mm²] – Módulo de elasticidade dinâmico; L [mm] – Comprimento do provete; f_0 [Hz] – Frequência de ressonância longitudinal; ρ [N/m³] – Peso volúmico do material constituinte do provete; g [9,81 m/s²] – Aceleração da gravidade.

Foram determinados quatro módulos de elasticidade para cada provete, alternando a posição do provete no equipamento. Os módulos de elasticidade obtidos através do programa nem sempre são da mesma gama de valores, sendo necessária uma análise crítica pós-ensaio de modo a seleccionar a gama de valores que melhor se adapta ao material, ou seja, a correta. Esta análise de resultados, para além do bom senso, recorreu a comparações com outros trabalhos realizados com argamassas semelhantes, tanto às argamassas onde se utilizou resíduo de borracha como a de referência.

3.6.2 Resistência à tração por flexão

Após o término da obtenção do módulo de elasticidade, o próximo passo da campanha experimental passa pela obtenção dos valores da resistência à tração por flexão. A metodologia utilizada foi a referida na norma EN 1015-11 (CEN, 1999), recorrendo a uma máquina universal de tração “*ZWICK Z050*” (Figura 3.11a) para aplicar as cargas aos provetes a ensaiar. O ensaio passa então por colocar cada provete sobre os apoios de um acessório do aparelho, distando estes de 100 milímetros entre si. Há que ter o cuidado de posicionar corretamente o provete nos apoios para a carga ser aplicada exatamente no seu centro. Outro cuidado a ter é o de colocar o provete de modo a que a sua face rugosa esteja disposta lateralmente, para evitar irregularidades na zona dos apoios e de aplicação de carga (Figura 3.11b).

O equipamento, equipado com uma célula de carga de 2 kN, aplica um carregamento a meio vão do provete, comprimindo a face em contacto com a célula de carga. Por conseguinte, a face inferior vai ficar

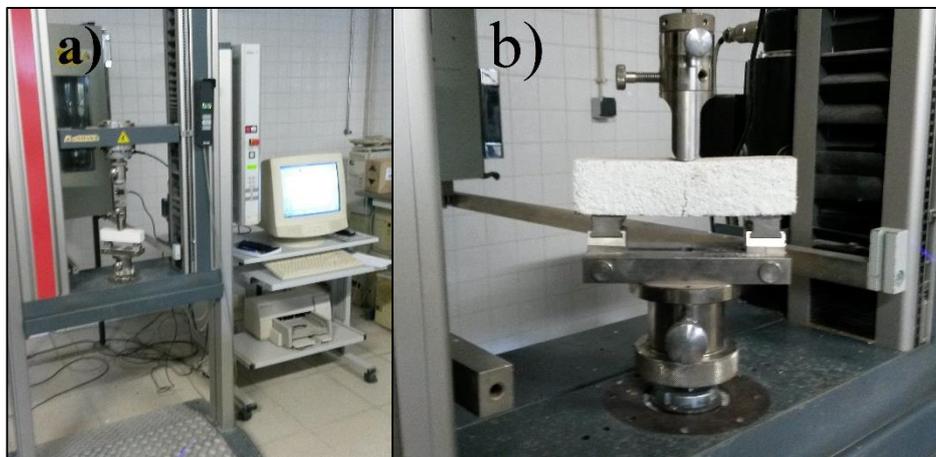


Figura 3.11 - Equipamento "ZWICK" e provete ensaiado à flexão por tração

tracionada. O *software* com o qual o aparelho funciona, contabiliza a aplicação da carga crescente em função do tempo. Ao momento em que a zona tracionada do provete rompe, está associada diretamente a carga máxima de carregamento, chamada de carga de rotura. Note-se que o ensaio em questão é um ensaio destrutivo pois o provete ensaiado rompe, originando duas partes sensivelmente iguais.

O *software* incorporado ao aparelho *ZWICK*, ao longo do decorrer dos ensaios, fornece um gráfico que relaciona a força imposta ao provete com a deformação ocorrida a meio vão, ao longo do tempo. Analisando o gráfico de cada provete, a carga última de rotura é aquela que corresponde a um pico (valor mais elevado) e a que lhe está adjacente uma descida brusca, no que diz respeito aos valores de força imposta. Após a realização do ensaio, há que tratar os dados obtidos e traduzi-los em termos de resistência. Para tal, recorre-se à equação 3.6;

$$R_T = \frac{M \times x_2}{I} \quad (\text{equação 3.6})$$

onde:

R_T [MPa] – Resistência à tração por flexão; M [N.mm] – Momento produzido pela carga aplicada; x_2 [mm] – Altura do provete; I [mm⁴] – Inércia da secção do provete.

Tendo em conta a geometria quadrangular da secção do provete, e, considerando um modelo simplesmente apoiado, obtém-se a equação 3.7, que traduz o cálculo do momento criado pela carga aplicada e para a inércia do provete;

$$M = \frac{P \times l}{4} \quad (\text{equação 3.7})$$

onde:

M [N.mm] – Momento criado pela carga aplicada a meio vão; P [N] – Carga aplicada a meio vão; l [mm] – Distância entre apoios.

Por sua vez, é conhecida a expressão que traduz o momento de inércia de uma secção retangular, expressa pela equação 3.8;

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (\text{equação 3.8})$$

onde:

I [mm⁴] – Inércia da secção do provete; b [mm] – Largura da secção do provete; h [mm] – Altura da secção do provete.

Simplificando as expressões acima indicadas, a resistência à tração por flexão pode ser expressa pela equação 3.9;

$$R_T = \frac{3 \times P \times l}{2 \times b \times h^2} \quad (\text{equação 3.9})$$

3.6.3 Resistência à compressão

Os provetes a ensaiar à compressão são uma das metades obtidas do ensaio de tracção por flexão. O ensaio é baseado na mesma norma utilizada para o ensaio anteriormente descrito, a norma EN 1015-11 (CEN, 1999). O princípio base do ensaio é a aplicação de um carregamento numa área de 40x40 mm², com

recurso novamente ao equipamento “ZWICK Z050”. Confina-se o provete a ensaiar num utensílio de suporte metálico no qual o provete deve ser centrado e colocado com a superfície rugosa lateralmente (Figura 3.12a). Este utensílio tem como finalidade conferir o contacto completo entre o aparelho e o provete. A célula de carga para este ensaio será de 50 kN e o ensaio decorrerá a uma velocidade de 0,7 mm/min. Ao iniciar-se o ensaio, o aparelho aplicará um carregamento de valor crescente, que levará o provete à rotura por compressão. Ao momento em que o provete rompe, está diretamente associado uma força máxima de compressão. O ensaio é destrutivo, logo o provete ensaiado irá quebrar-se em três partes diferentes, sendo estas guardadas devidamente para futuros ensaios (Figura 3.12b).

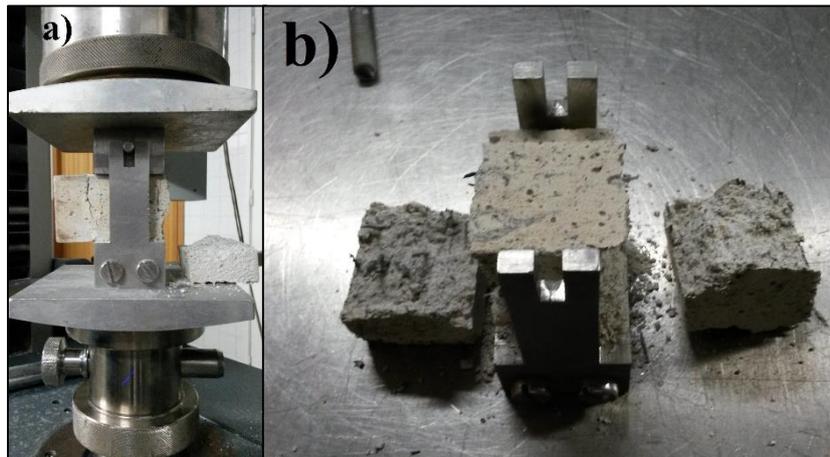


Figura 3.12 - Ensaio e rotura à compressão de um provete prismático da argamassa

Na realização do ensaio, o *software* anexo à máquina apresenta gráficos que avaliam o valor do carregamento aplicado ao provete com o deslocamento causado, em relação ao tempo. Analogamente ao ensaio de tração por flexão, a carga que está associada à rotura é aquela a que corresponde o pico visto no gráfico, acompanhado por um decréscimo brusco imediatamente após a rotura do provete. Para obter os valores de resistência à compressão R_c [MPa], há que realizar o quociente da carga de rotura F_c [N] pela correspondente área de aplicação do carregamento S [mm²].

3.6.4 Absorção de água por capilaridade

Descrição do ensaio

O principal objetivo da realização deste ensaio é a avaliação do poder de absorção de água por capilaridade, ou seja, pelos poros do provete. A água, quando em contacto com os poros de um material, tem tendência a ascender por estes devido a uma diferença de pressão existente nos poros, originada pela superfície curva da água (estado líquido) e o ar (estado gasoso). O ensaio foi realizado tendo como base as normas EN 15801 (CEN, 2009) e EN 1015-18 (CEN, 2002), e foi realizado na sala de cura condicionada, encontrando-se esta a uma temperatura de 20 ± 3 °C e com uma humidade relativa de 65 ± 5 %. Após o término do ensaio de tração por flexão, as metades guardadas para efetuar o ensaio de absorção por capilaridade cortaram-se, por meio de um serrote, de modo a ficarem com um formato cúbico com quatro centímetros de

aresta (Figura 3.14a). Os provetes foram de seguida guardados em estufa ventilada, à temperatura de 60°C, durante 48 horas para garantir completa secagem até ao início do ensaio. Findas as 48 horas, deixam-se os provetes arrefecer um pouco e procede-se à sua pesagem (Figura 3.13b).

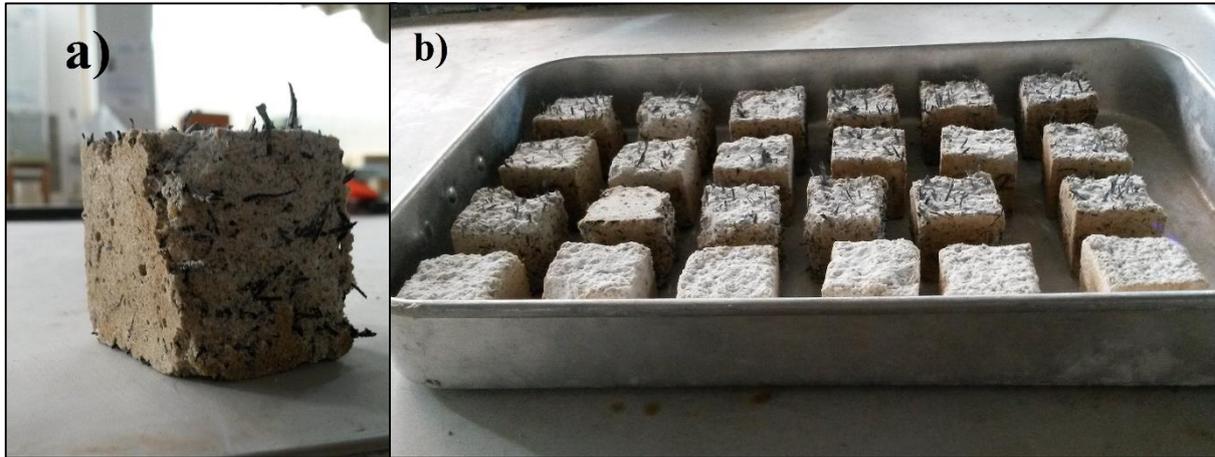


Figura 3.14 - Provetes cúbicos cortados com serrote com 4 cm de aresta

Seguidamente, os provetes foram pincelados lateralmente com cera em estado líquido tendo esta sido aquecida num recipiente metálico para o efeito. O uso de cera no ensaio serve para a ascensão de água se dar apenas pela face inferior do provete, a face que irá estar em contacto com a água. Antecipadamente, foi preparada uma caixa estanque de plástico com tampa que permite criar um ambiente próximo do saturado quando for introduzida a água (Figura 3.14a). Na caixa foram colocados dois tijolos, sobre os quais foi assente um tabuleiro. Este tabuleiro nivelou-se corretamente, sendo colocada uma rede de borracha no fundo para criar uma altura que permita a face inferior do provete estar em contacto total com a água, facilitando a absorção de água pela base. Esta, por sua vez, deve ser introduzida no tabuleiro de maneira a ser criada uma lâmina de água de 5 mm em toda a área do tabuleiro, garantindo-se esta altura por intermédio de uma régua metálica. Esta altura de água, bem como o fecho da tampa da caixa, foram garantidas ao longo de todo o ensaio (Figura 3.14b). Cada provete é pesado (Figura 3.14c) novamente após a secagem da cera para o instante 0s (massas secas) e colocado no tabuleiro. Fizeram-se pesagens aos provetes a 5, 15, 30 e 60 minutos após a imersão inicial. A partir daqui, as pesagens foram feitas de hora a hora, até se atingir um patamar de estabilização de absorção. Ao ser atingido este patamar, as medições foram realizadas de 24 em 24 horas, terminando o ensaio quando a variação de massa de cada provete foi inferior a 1%. Note-se que a pesagem

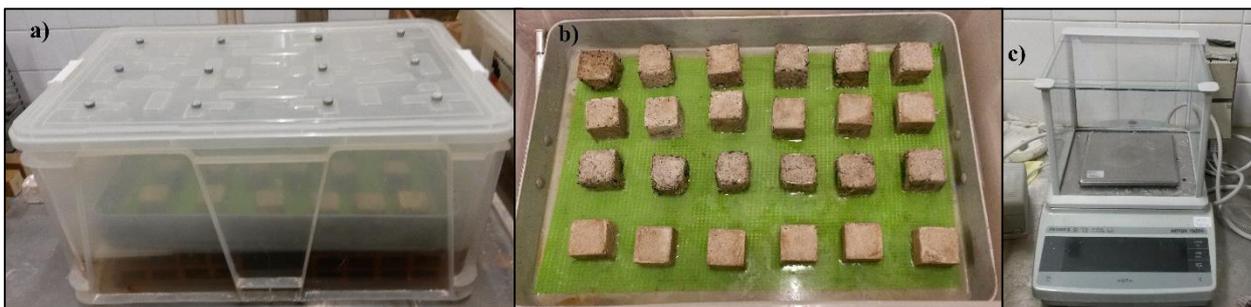


Figura 3.13 – a) Ensaio de absorção de água por capilaridade; b) caixa estanque; provetes ensaiados em tabuleiro com lâmina de água de 5 mm; c) balança de precisão de 0,1 g

dos provetes foi feita cuidadosamente para evitar a queda de gotículas de água sobre outros provetes, e o mais rápido possível para garantir que a caixa esteja aberta o menos tempo possível.

Com os dados relativos às pesagens de cada provete ao longo do tempo, traçou-se a curva de absorção. Esta é expressa em gráfico, onde relaciona a quantidade de água absorvida pela área da superfície do provete em contacto com a água em função da raiz quadrada do tempo para cada instante, sendo a quantidade de água absorvida dada pela equação 3.10;

$$M = \frac{m_i - m_0}{A} \quad (\text{equação 3.10})$$

onde:

M [kg/m²] – Massa da quantidade de água absorvida no instante i; m_i [kg] – Massa do provete para o instante i; m₀ [kg] – Massa do provete seco para o instante 0 segundos; A [m²] – Área da superfície do provete em contacto com a água.

Estes valores de quantidade de água absorvida de cada provete foi tratado por tipo de argamassa, sendo o valor de cada tipo de argamassa o valor médio dos três provetes ensaiados. Os pontos que geram o início da curva têm associados um declive inicial. Este declive representa o coeficiente de capilaridade (CC), e é dado por uma regressão linear do tipo $y = m \times x + b$. O processo de cálculo do CC de cada argamassa é análogo ao da quantidade de água, uma vez que foi feita a média dos três provetes para cada tipo. O valor assintótico (VA) de cada curva de absorção é o valor máximo de água absorvida por capilaridade. A determinação deste valor para cada argamassa foi feito novamente por intermédio da média dos provetes ensaiados de cada tipo.

3.6.5 Secagem

Descrição do ensaio

Após o fim do ensaio de absorção de água por capilaridade, isto é, quando a diferença de massa de duas pesagens consecutivas de 24 horas é inferior a 1%, dá-se imediatamente início ao ensaio de secagem. O procedimento tem por base a norma EN 16322 (CEN, 2013) e realiza-se na mesma sala condicionada referida no ensaio de capilaridade. O ensaio tem como objetivo a avaliação do comportamento das várias argamassas à quantidade de água perdida ao longo do tempo, desde o estado saturado. Cada provete foi envolto por película aderente na sua base, ou seja, a face que durante o ensaio de capilaridade tinha sido sujeita ao contacto com água. A película aderente foi fixada em cada provete por meio de um elástico, de modo a tapar apenas a sua base (Figura 3.15a). A evaporação de água ocorrerá apenas pela face paralela à tapada por película aderente, uma vez que as restantes tinham sido pinceladas com cera líquida previamente ao ensaio de capilaridade. Os provetes foram colocados numa mesa na sala condicionada durante todo o ensaio (Figura 3.15b). Pesaram-se os provetes após a colocação da película aderente. Efetuaram-se pesagens aos provetes, com recurso a uma balança de precisão de 0,001 g, no primeiro dia de hora a hora durante as primeiras quatro horas, e, posteriormente efetuaram-se pesagens diariamente de 24 em 24 horas. O ensaio considera-se terminado quando a variação de massa dos provetes de um dia para outro for mínima, ou já estejam estes em equilíbrio com o ambiente da sala condicionada.

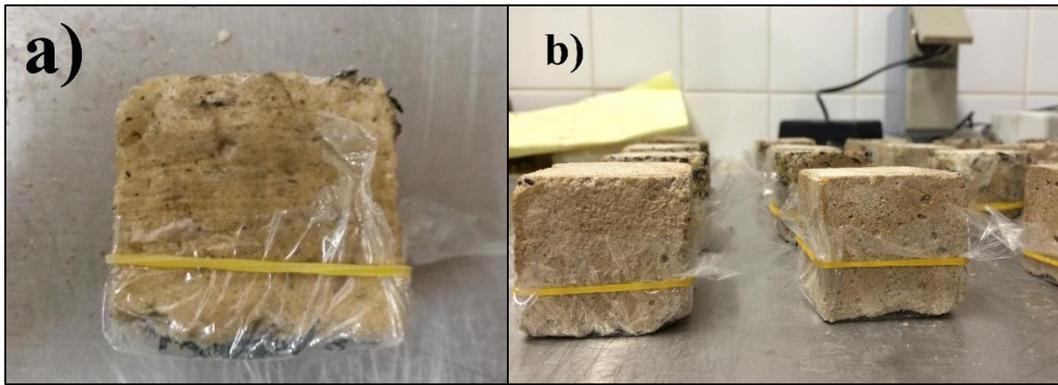


Figura 3.15 - Ensaio de secagem: a) provete com película aderente na base; b) provetes na sala

Com as massas obtidas do ensaio de secagem é possível o traçado de curvas de secagem através do cálculo da quantidade de água nos provetes aos instantes em causa, M_i . Para tal, realiza-se o quociente da diferença de massa entre a massa medida para o instante t e a massa final pela área de secagem, como explicito na equação 3.11;

$$M_i = \frac{m_i - m_f}{A} \quad (\text{equação 3.11})$$

onde:

A [m^2] – Área da superfície de secagem do provete; m_i [kg] – Massa do provete para o instante i ; m_0 [kg] – Massa final do provete.

Para além da curva de secagem, procedeu-se também ao cálculo do índice de secagem de cada argamassa (IS). A norma define o cálculo deste parâmetro pela equação 3.12. Utilizou-se uma expressão simplificada aplicando o método do trapézio (método de integração numérica, Grilo et al. (2014)), sendo regida pela equação 3.12;

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_i + W_{i-1}}{2} \right]}{t_f \times W_{max}} \quad (\text{equação 3.12})$$

onde:

IS [-] – Índice de secagem; t_i [h] – Instante i do ensaio; t_f [h] – Instante final do ensaio; W_i [%] – Teor em água do provete para o instante t_i ; W_{max} [%] – Teor em água máximo do provete.

A taxa de secagem (TS1), correspondente à primeira fase de secagem (D1 com EN 16322), corresponde ao declive das medições efetuadas no primeiro dia de cada curva de secagem, sendo que foi calculado a média dos três valores correspondentes de TS para cada argamassa, bem como o desvio padrão associado.

3.6.6 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica (λ) é uma característica intrínseca de cada material, que traduz a capacidade de um material se deixar atravessar por calor. Esta define-se como a quantidade de calor que atravessa uma unidade de espessura do material, por unidade de área e diferença de temperatura [$\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$]. A condutibilidade térmica é uma característica que se relaciona diretamente com a porosidade de um material, uma vez que os valores de condutibilidade térmica são mais baixos quanto mais poroso o material

for. Para a realização deste ensaio foram utilizados os provetes cilíndricos com 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. A realização do ensaio passou pela utilização de um equipamento, o “ISOMET Model 2104” (Figura 3.16), sendo o procedimento de ensaio o descrito no seu manual de especificações. As medições feitas pela máquina são baseadas na análise da resposta do fluxo de calor emitido, fluxo este que é produzido por intermédio do aquecimento de uma resistência elétrica inserida no sensor que se coloca em contacto com a amostra. O equipamento foi utilizado nas faces lisas dos provetes e, sob estes, foi colocada uma placa de XPS de modo a que a temperatura da bancada, naturalmente mais baixa que a do material, não influencie o ensaio. O ensaio passa então pela colocação de uma sonda ligada ao aparelho sobre a face lisa do provete, e selecionar no equipamento a opção “Thermal Conductivity”, processo este que leva cerca de 15 a 20 minutos.

O equipamento realiza praticamente o ensaio sozinho, com exceção do condicionamento das condições de fronteira (placa de XPS) e da seleção da opção de análise da condutibilidade térmica. No final, o equipamento fornece os valores de condutibilidade térmica, calor específico por volume, c_p [$J/m^3.K$], e difusibilidade térmica, a [m^2/s].



Figura 3.16 - Aparelho "Isomet" para medição da condutibilidade térmica

3.6.7 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

O ensaio foi realizado às partes de provete com topo liso resultantes do ensaio de compressão, tendo como base a norma NP EN 1936 (IPQ 2009), estabelecida para ensaios a pedras naturais. Os provetes foram colocadas durante 72 horas em estufa para serem obtidas condições de massa constante antes do início do ensaio. Estes, após retirados da estufa, foram limpos para garantir a eliminação do material desagregado no provete (Figura 3.17a), e seguidamente pesados numa balança de precisão 0,001g (Figura 3.18). Finalizada a sua preparação, os provetes foram introduzidos num exsiccador conectado por dois tubos, um a uma bomba de vácuo e outro ao exterior para a posterior introdução de água (Figura 3.17b).



Figura 3.18 - Provete ensaiado resultante do ensaio de compressão e exsicador para o ensaio de porosidade aberta

Selou-se o exsicador com a tampa, garantindo o seu total isolamento, e ligou-se a bomba de vácuo durante 24 horas, processo que irá reduzir a pressão dentro do exsicador. Findas as 24 horas, insere-se água no exsicador, sem abrir a sua tampa, através de um tubo ligado ao topo desta. O processo é moroso (aproximadamente 15 minutos), estando terminado quando os provetes estiverem completamente submersos na água. Os provetes vão estar sujeitos a estas condições durante 24 horas e, quando completadas, desliga-se a bomba de vácuo e abre-se a torneira do topo da tampa do exsicador para submeter os provetes à pressão ambiente enquanto submersos em água. Após 24 horas à pressão ambiente, os provetes são retirados do exsicador e vão ser pesados da seguinte forma: pesagem em imersão hidrostática de três provetes seguidos, de modo a minimizar as perdas de água; seguidamente, os mesmos três provetes são colocados num pano húmido para retirar o excesso de água e são pesados. O processo repete-se até todos os provetes terem sido pesados.

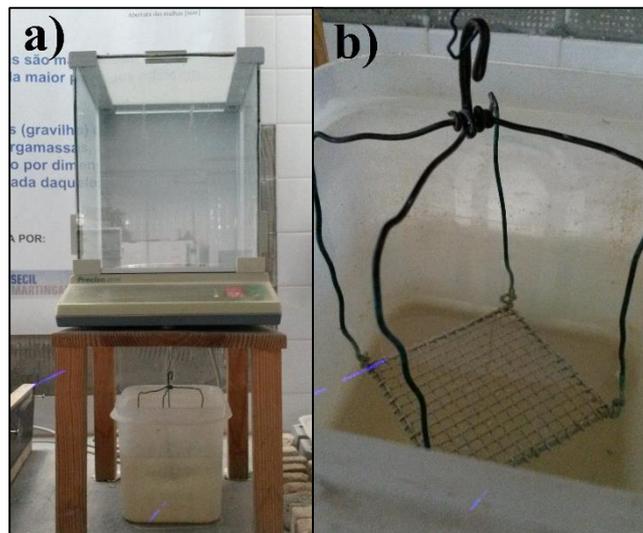


Figura 3.17 - Balança de precisão de 0,001 g

Tendo em conta que já se registaram as massas secas, hidrostáticas e saturadas dos provetes, o cálculo da porosidade aberta passa pelo uso da equação 3.13;

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100[\%] \quad (\text{equação 3.13})$$

onde:

P_{ab} [%] – Porosidade aberta; m_1 [g] – Massa da amostra seca; m_2 [g] – Massa hidrostática da amostra; m_3 [g] – Massa saturada da amostra.

Note-se que a diferença de massa saturada e seca corresponde ao volume de vazios, enquanto a diferença de massa saturada e hidrostática ao volume total.

O cálculo da massa volúmica pelo método da pesagem hidrostática é obtido através da equação 3.14;

$$MV_{ap} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 \quad (\text{equação 3.14})$$

onde:

MV_{ap} [kg/m³] – Massa volúmica aparente.

3.6.8 Permeabilidade ao vapor de água

O conhecimento da quantidade de vapor de água que atravessa uma argamassa é importante na medida que é pretendido que as argamassas aplicadas em revestimentos sejam impermeáveis à água mas permeáveis ao vapor de água. Tendo isto em conta, procedeu-se à realização do ensaio de permeabilidade ao vapor de água, com base nas normas EN 15803 (CEN, 2009) e EN NP 1015-19 (IPQ, 2009). Existem dois métodos diferentes para a realização deste ensaio: o método da tina húmida e método da tina seca. O adotado para este ensaio foi o primeiro dos dois referidos. O processo passa pela utilização de moldes metálicos, onde inicialmente foi colocada água, até ser atingida uma lâmina de água de cerca de um centímetro, e algodão hidrófilo (Figura 3.19a). A colocação de água é necessária de forma a garantir sempre a existência de água até o ensaio terminar e conseqüente ambiente saturado em termos de humidade relativa, enquanto o algodão serve para evitar que a água salpique o provete durante os processos de pesagem. Os provetes ensaiados foram os provetes cilíndricos, de 90 milímetros de diâmetro e 20 milímetros de altura. Após a colocação do algodão e da água, estes foram colocados centrados nos moldes de ensaio. Para garantir a estanquidade ao vapor de água, o espaço entre o provete e a cápsula de ensaio foi vedado com silicone. De seguida, aplicou-se também silicone em aros plásticos colocados em cima do provete, para se garantir a mesma área de influência. Determinou-se a massa do conjunto para cada um dos provetes numa balança de precisão de 0,001 g (Figura 3.19b), após a aplicação do silicone. Estes foram seguidamente colocados em câmara climática (Figura 3.19c) a uma temperatura de 23°C e humidade relativa de 40% (embora em EN 15803 (CEN, 2009) esteja estabelecido que o ensaio deva ser realizado a 50% de HR), sendo registado o instante inicial de tempo de colocação dos provetes na câmara climática. As pesagens aos provetes foram feitas diariamente (Figura 3.19d) de forma a conseguir-se determinar a quantidade de vapor de água que atravessa os provetes, terminando o ensaio quando a quantidade de vapor de água atinja um regime estacionário. Isto é, quando pelo menos três das diferenças de massa entre pesagens seguidas seja abaixo dos 5%.



Figura 3.19 - Permeabilidade ao vapor de água

Com os valores das pesagens obtidos calcula-se as diferenças de massa entre pesagens, sendo esta diferença de massa a quantidade de vapor de água que se difunde pelos provetes. Note-se que para cada tipo de amassadura, o ensaio foi realizado em três provetes distintos para ser possível a obtenção da média e desvio padrão correspondentes. A permeância ao vapor de água é dada pela equação 3.15;

$$\pi = \frac{G}{A \times \Delta P} \quad (\text{equação 3.15})$$

onde:

π [kg/(m².s.Pa)] – Permeância ao vapor de água; G [kg/s] – Fluxo de vapor de água por unidade de tempo. É calculado a partir do quociente da média dos valores em regime estacionário por unidade de tempo; A [m²] – Área de ensaio do provete; ΔP [Pa] – Diferencial de pressão de água entre as duas faces do provete.

O cálculo de uma dada pressão P , em Pa, é obtido pela equação 3.16;

$$P = P_s \times \frac{HR}{100} \quad (\text{equação 3.16})$$

onde:

P_s [Pa] – Pressão parcial de saturação, em função da temperatura (ver Quadro.3.2) HR [%] – Humidade relativa

Como o ensaio decorreu a 40% de humidade relativa e a 23 °C, tem-se:

$$P_{40} = 2806 \times \frac{40}{100} = 1122,40 \text{ Pa}$$

$$P_{100} = 2806 \text{ Pa}$$

$$\Delta P = 2806 - 1122,40 = 1683,6 \text{ Pa}$$

A permeabilidade ao vapor de água é dada pela equação 3.17;

$$\delta = \pi \times e \quad (\text{equação 3.17})$$

onde: δ [kg/(m.s.Pa)] – Permeabilidade ao vapor de água; π [kg/(m².s.Pa)] – Permeância ao vapor de água; e [m] – Espessura do provete ensaiado.

Quadro 3.2 - Pressão de saturação em função da temperatura [Henriques, 2011]

Temperatura (°C)	Ps (Pa)
18	2060
19	2195
20	2336
21	2483
22	2640
23	2806
24	2980

Ao relacionar a permeabilidade ao vapor de água do ar com a do material ensaiado, é possível obter o fator de resistência à difusão, μ , como mostrado na equação 3.18;

$$\mu = \frac{\delta_{ar}}{\delta} \quad (\text{equação 3.18})$$

onde:

μ [-] – Fator de resistência à difusão do vapor de água; δ_{ar} [kg/(m.s.Pa)] – Permeabilidade ao vapor de água do ar [$1,94 \times 10^{-10}$ kg/(m.s.Pa)]; δ [kg/(m.s.Pa)] – Permeabilidade ao vapor de água do material ensaiado.

Por fim, pode ser determinado ainda outro parâmetro, a espessura de camada de ar de difusão ao vapor de água equivalente, Sd , a partir das permeabilidades ao vapor de água, como descrito na equação 3.19;

$$Sd = 1,95 \times 10^{-10} \times \frac{e}{\pi} \quad (\text{equação 3.19})$$

onde:

Sd [m] – Espessura de camada de ar de difusão ao vapor de água equivalente; π [kg/(m².s.Pa)] – Permeância ao vapor de água; e [m] – Espessura do provete ensaiado.

3.6.9 Porosimetria de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio permite avaliar a microestrutura da argamassa. Especificamente, o ensaio analisa a forma e dimensão dos poros, pela intrusão de mercúrio no material. Os provetes ensaiados foram os resultantes do ensaio de resistência à compressão, sendo ensacados e guardados após o decorrer do ensaio. Por sua vez, o ensaio só foi realizado a dois tipos de amassadura, sendo estas a de referência (REF) e a mistura de 5% de borracha (MIX_5). A realização do ensaio decorreu com recurso ao porosímetro “Autopore IV – Micromeritics” (Figura 3.20). Este equipamento tem duas portas de baixa pressão e uma de alta pressão, estando também ligado a um software de cálculo.

As amostras são de dimensões reduzidas porque o penetrómetro também o é, e são mantidas em estufa a 40°C até atingirem massa constante. Estas são pesadas e introduzidas no penetrómetro, sendo o conjunto selado por intermédio de sílica-gel e também pesado.

O ensaio inicia-se no módulo de baixa pressão, sendo esta reduzida para 100 μmHg . Com o mercúrio já introduzido, o equipamento faz a pressão aumentar em 15 patamares distintos e pré-definidos. Quando o processo se conclui, reduz-se a pressão no interior à pressão atmosférica e pesa-se de novo o conjunto.

Findo o processo de baixa pressão dá-se início o processo de alta pressão. Este processo é em tudo análogo ao anterior, com a diferença de que agora o equipamento faz a pressão aumentar em 67 patamares de intrusão e 27 de extrusão (Rato, 2006).

Os resultados são obtidos diretamente do programa, tanto em termos de intrusão de mercúrio e correspondente dimensão de poros como de porosidade aberta e de massa volúmica aparente. Por sua vez, note-se que estes dois últimos parâmetros podem não ser muito fiáveis.



Figura 3.20 – Porosímetro *Autopore* e entradas do penemómetro de baixa pressão

4 Resultados da Campanha Experimental

No presente capítulo é apresentada a constituição e dosagens das argamassas e são expostos e analisados os resultados referentes à campanha experimental realizada. Os resultados dos ensaios estão separados em ensaios aos constituintes, ensaios no estado fresco e no estado endurecido. Para facilitar a análise dos resultados apresentam-se figuras e quadros, sendo posteriormente discutidos.

4.1 Materiais constituintes das argamassas

4.1.1 Análise granulométrica

Na Figura 4.1 estão apresentadas as curvas granulométricas dos quatro tipos de areia e da mistura de areias utilizada, enquanto na Figura 4.2 apresentam-se as curvas granulométricas relativas ao resíduo de borracha, tanto da amostra global como de cada grupo utilizado no presente trabalho.

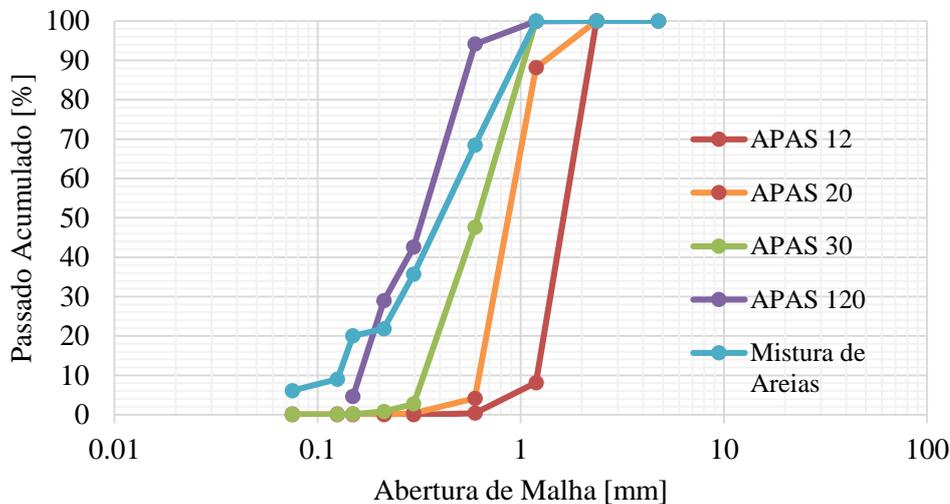


Figura 4.1 - Curva granulométrica de cada areia e da mistura de areias

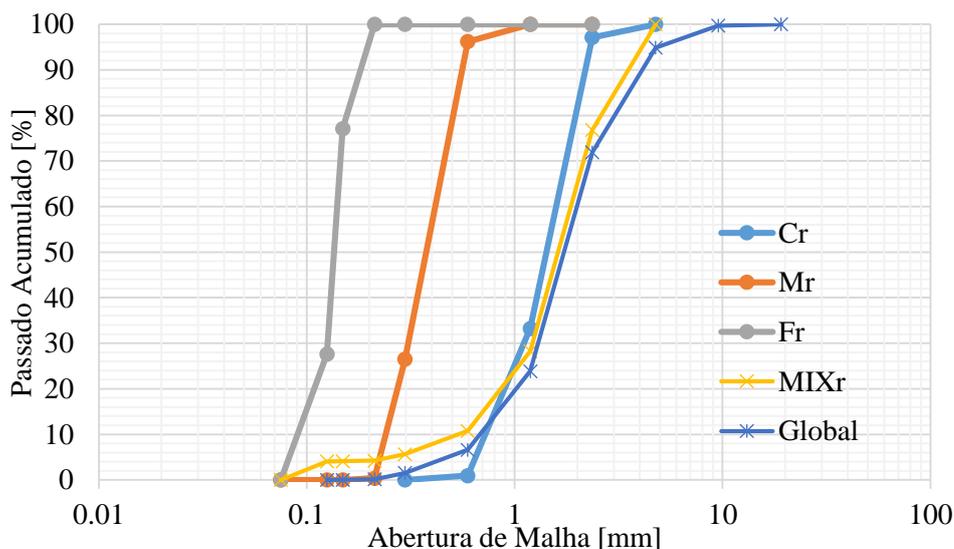


Figura 4.2 - Curvas granulométricas de cada fração granulométrica e da mistura utilizadas, assim como do resíduo de borracha na sua globalidade

Como se pode observar na Figura 4.2, a maior percentagem do resíduo de borracha da amostra global encontra-se abaixo do peneiro de 2,36 mm. A gama de resíduo mais grosso apresenta a forma e a granulometria muito variada, tendo na sua constituição pedaços muito longos e extensos que não seriam compatíveis com a areia. Tendo isto em conta, foi a partir daqui que se procedeu à decisão da realização de três grupos distintos de resíduo: agregado “fino” (**Fr**), com partículas de dimensão inferior a 0,212 mm, agregado “médio” (**Mr**), com partículas de dimensão entre os 0,212 mm e os 0,6 mm, e agregado “grosso” (**Cr**), com partículas entre os 0,6 mm e os 2,36 mm.

Comparando a granulometria da mistura de areias com a mistura de resíduo de borracha utilizada constata-se que a granulometria da areia apresenta uma maior quantidade de partículas finas do que a do resíduo. No entanto, a forma das partículas é diferente e a quantidade de resíduo adicionada é baixa quando comparada com a quantidade de areia. Este facto traduz a compatibilidade de utilização dos materiais em simultâneo.

Analisando apenas as curvas de Fr, Mr e Cr, é normal que o seu aspeto seja o descrito na Figura 4.2 uma vez que a sua granulometria está balizada.

4.1.2 Baridade

Para cada material foram feitas três pesagens, sendo que os resultados mostrados são relativos à média dos três valores de baridade obtidos para cada material.

Quadro 4.1 - Baridade dos agregados e ao ligante

Areias	Baridade [kg/m^3]		Borracha	Baridade [kg/m^3]	
	Méd	DP		Méd	DP
APAS 12	1419	8	Grupo 1	340	4
APAS 20	1399	10	Grupo 2	286	3
APAS 30	1368	53	Grupo 3	341	7
APAS 120	1326	9	Mistura	289	7
Mistura	1643	3	NHL 3,5	688	3

4.2 Dosagens e argamassas no estado fresco

4.2.1 Dosagens das argamassas

No Quadro 4.2 estão apresentadas a constituição em massa das argamassas formuladas, bem como os traços em massa e volume (dos constituintes da argamassa individualmente e do agregado total) e as razões água/ligante, água/borracha e água/sólidos.

Como os resíduos de borracha são utilizados como adição, as massas de NHL 3,5 e de areia são sempre constantes. Por sua vez, dado que a água foi adicionada para cada amassadura de forma a garantir uma boa trabalhabilidade, a sua massa varia

Quadro 4.2 - Massa dos constituintes das argamassas, traços em massa e em volume, relação água/ligante, água/borracha e água/sólidos

Amassadura	m (kg)				Água/ligante	Água/borracha	Água/sólidos
	NHL 3,5	Areia	Borracha	Água			
Ref	0,558	4	0	0,65	1,16	-	0,14
MIXr_2.5	0,558	4	0,1	0,7	1,25	7,00	0,15
MIXr_5	0,558	4	0,2	0,74	1,33	3,70	0,16
MIXr_7.5	0,558	4	0,3	0,76	1,36	2,53	0,16
Fr_5	0,558	4	0,2	0,82	1,47	4,10	0,17
Mr_5	0,558	4	0,2	0,72	1,29	3,60	0,15
Cr_5	0,558	4	0,2	0,75	1,34	3,75	0,16

. Nas argamassas cuja adição de borracha foi feita com a mistura dos três grupos, quanto maior a percentagem de borracha introduzida, mais água é necessária para garantir as mesmas condições de trabalhabilidade. Isto traduz o facto da existência de uma maior quantidade de partículas de borracha na argamassa, cuja forma é muito variável. Quando analisados Fr_5, Mr_5 e Cr_5 não se encontra à partida nenhuma relação direta com a quantidade de água introduzida na argamassa. Por sua vez, Fr_5 é a argamassa que necessita da maior quantidade de água, e dado que esta fração de resíduo é o que possui granulometria mais fina (pó de resíduo de borracha), deduz-se que, para a mesma quantidade, granulometrias mais finas implicam menos trabalhabilidade.

4.2.2 Consistência por espalhamento e por penetrómetro

No Quadro 4.3 encontram-se os resultados do ensaio de espalhamento de cada uma das argamassas efetuadas. Nota-se que o espalhamento não é muito variável, embora todos os valores sejam mais elevados do que Ref. Este facto está relacionado com a quantidade de água introduzida durante a amassadura, porque a incorporação de borracha leva à necessidade de se adicionar mais água para manter os níveis de trabalhabilidade pretendidos Tendo em conta que o intervalo que é considerado adequado é de 150 ± 10 mm, os valores estão ligeiramente acima do limite superior. Considerando que Ref já por si estava acima do limite, como nas restantes a relação água/ligante (Quadro 4.3) superior, o resultado era esperado.

Quadro 4.3 – Consistência por espalhamento e por penetrómetro das argamassas

Argamassa	Esp [mm]		Penetrómetro [mm]
	Méd	DP	
Ref	166	1	15
MIXr_2.5	172	2	17
MIXr_5	167	0	16
MIXr_7.5	170	1	12
Cr_5	171	1	18
Mr_5	173	2	16
Fr_5	169	0	18

4.2.3 Retenção de água

No Quadro 4.4 apresentam-se os valores de retenção de água. Verifica-se uma pequena oscilação de valores, sendo que a retenção de água é maior para partículas menores e decresce com o aumento de percentagem de borracha na mistura.

Quadro 4.4 - Retenção de água das argamassas

Argamassa	Retenção de água [%]	
	Méd	DP
Ref	81,0	0,3
MIXr_2.5	82,4	0,5
MIXr_5	80,8	0,6
MIXr_7.5	80,1	1,0
Cr_5	76,7	1,3
Mr_5	80,7	0,3
Fr_5	81,4	0,3

4.2.4 Massa volúmica no estado fresco

Seguidamente na Figura 4.3 apresentam-se os valores de massa volúmica obtidos para o estado fresco.

Nota-se um decréscimo dos valores de massa volúmica face à referência o que era expectável devido à borracha ter uma baridade inferior à da areia. No entanto, este decréscimo não é muito acentuado, sendo mais verificado em Mixr_7.5 por ter maior quantidade de borracha.

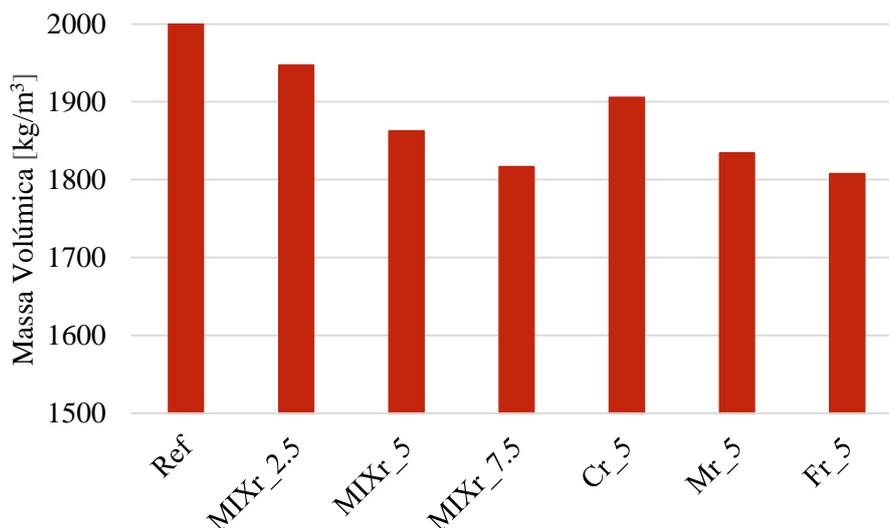


Figura 4.3 - Massa volúmica no estado fresco e geométrica para os diferentes tipos de argamassa

4.2.5 Teor de ar

No Quadro 4.5 encontram-se os resultados obtidos do ensaio de teor de ar e consistência por penetrómetro. Relativamente aos valores do teor de ar, a análise não se estende a todas as amostras. Porém, pode-se observar que a MIXr_5 é a que tem menos percentagem de teor de ar, e estes resultados mostram também que não existe uma tendência diretamente ligada com a fração granulométrica em causa.

Por sua vez, os resultados obtidos do ensaio de penetrómetro mostram que, com exceção de MIXr_7,5, as argamassas apresentam um assentamento maior quando comparadas à de referência. O facto de MIXr_7,5 ter maior percentagem de partículas de borracha pode ter levado a que estas façam com que a superfície da argamassa resista mais a este impacto, uma vez que estas têm diferentes formas e dimensões.

Quadro 4.5 – Resultados de teor de ar e penetrómetro

Argamassa	Teor de ar [%]
Ref	-
MIXr_2.5	-
MIXr_5	5,5
MIXr_7.5	-
Cr_5	7,0
Mr_5	6,3
Fr_5	7,8

4.3 Argamassas no estado endurecido

4.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é uma propriedade que avalia a deformabilidade das argamassas, estando este parâmetro diretamente relacionado com a resistência mecânica. No entanto a resistência não é um parâmetro cuja exigência não seja sempre a mais elevada, sendo esta variável consoante o tipo de aplicação a dar à argamassa. Não se pretende que a argamassa seja muito mais resistente que o suporte onde se aplica, mas sim que tenha uma resistência que permita garantir uma compatibilidade com esse suporte. O Quadro 4.6 mostra os valores médios e respetivos desvios padrões das diferentes argamassas, enquanto a Figura 4.4 apresenta a evolução dos valores médios de E_d .

Quadro 4.6 - Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico

Argamassa	E_d [Mpa]	
	Méd	DP
Ref	4773	170
MIXr_2.5	3613	154
MIXr_5	2291	284
MIXr_7.5	2027	392
Cr_5	2562	140
Mr_5	2380	140
Fr_5	1788	245

De uma análise global dos valores obtidos verifica-se que em comparação à referência, as argamassas apresentam um menor valor de E_d . Tal era expectável uma vez que a borracha tem características elásticas. A tendência da mistura de resíduo de borracha é com o aumento percentual da adição de borracha, diminui o valor de E_d . Por sua vez, quando mais fino é o resíduo introduzido, menor também é o valor de E_d .

Ao analisar a Figura 4.4, verifica-se que de todas as misturas, a Fr_5 é a que apresenta menor valor de E_d . Isto significa que quanto menor é o resíduo introduzido mais flexível será a argamassa. Por sua vez, em proporção, quanto maior a percentagem introduzida também mais flexível se torna a argamassa.

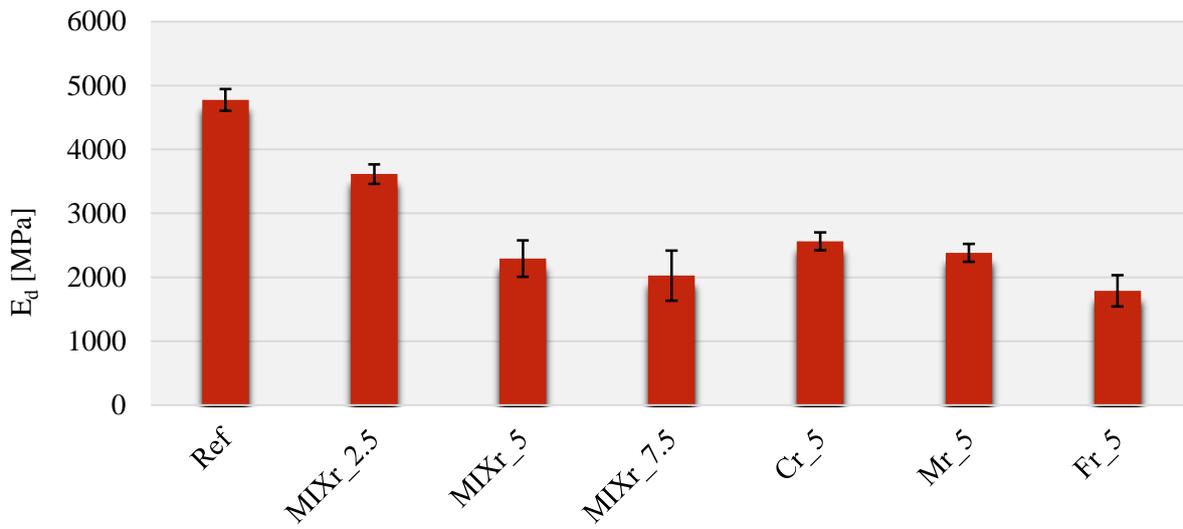


Figura 4.4 - Módulo de elasticidade dinâmico das diferentes argamassas

O módulo de elasticidade das argamassas deve ser idêntico ao do suporte de forma a evitar fissurações e destacamentos. Para alvenarias mais antigas, a aplicação destas argamassas seria proveitosa neste aspeto.

4.3.2 Resistência à tração por flexão

No Quadro 4.7 são apresentados os valores médios e de desvio padrão para os diferentes tipos de argamassa, enquanto a Figura 4.5 apresenta a evolução dos mesmos.

Quadro 4.7 - Valores médios e desvio padrão da resistência à tração por flexão

Argamassa	R_t [Mpa]	
	Méd	DP
Ref	0,49	0,05
MIXr_2.5	0,38	0,02
MIXr_5	0,27	0,04
MIXr_7.5	0,23	0,02
Cr_5	0,27	0,05
Mr_5	0,24	0,04
Fr_5	0,20	0,02

Ao analisar os valores obtidos, nota-se uma tendência semelhante à obtida no ensaio anterior, onde a resistência à tração diminui com o aumento de percentagem de borracha. Também se verifica esse decréscimo com a diminuição de resíduo introduzido na argamassa.

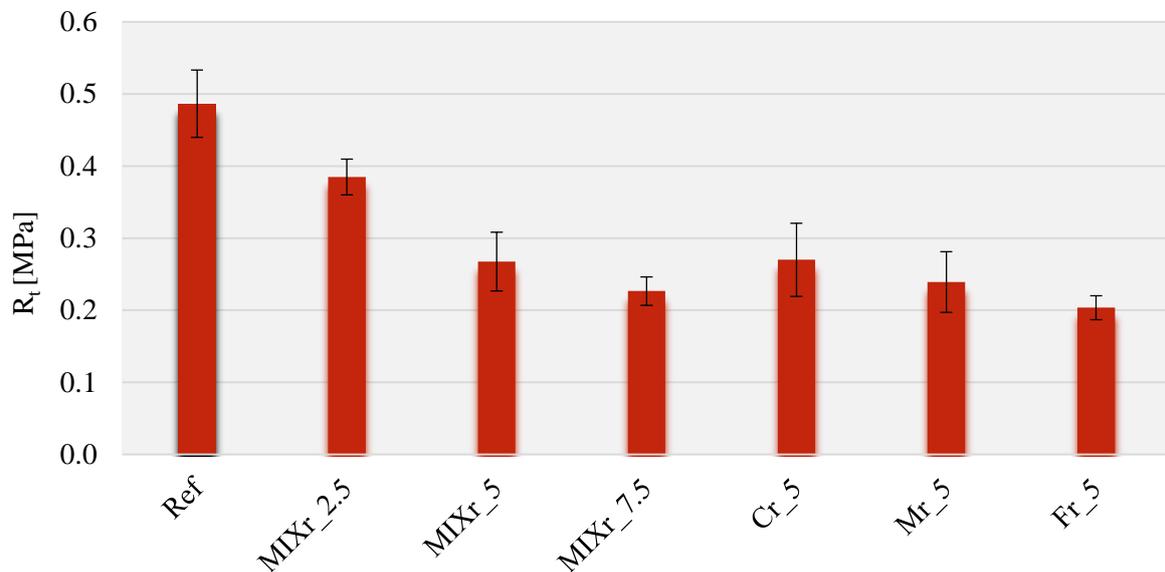


Figura 4.5 – Resistência à tração por flexão para as diferentes argamassas

Quando comparadas à argamassa de referência, verifica-se uma diminuição em todas as outras composições. Esta diminuição é acompanhada pelo aumento de percentagem de resíduo de borracha introduzido e com a diminuição do tamanho das partículas introduzidas. Isto demonstra que a borracha, como material resiliente, oferece menos resistência à tração.

4.3.3 Resistência à compressão

Seguidamente, no Quadro 4.8, são apresentados os valores médios e de desvio padrão da resistência à compressão. A Figura 4.6 oferece um andamento global dos resultados.

Quadro 4.8 - Valores médios e de desvio padrão para a resistência à compressão

Argamassa	R _c [Mpa]	
	Méd	DP
Ref	1,42	0,04
MIXr_2.5	0,65	0,08
MIXr_5	1,04	0,05
MIXr_7.5	0,58	0,04
Cr_5	0,69	0,08
Mr_5	0,65	0,06
Fr_5	0,47	0,04

À partida, nota-se que quando comparadas com a de referência, as restantes argamassas oferecem menor resistência à compressão. Embora haja uma ligação com o tamanho das partículas, não existe com o aumento de percentagem de resíduo introduzido.

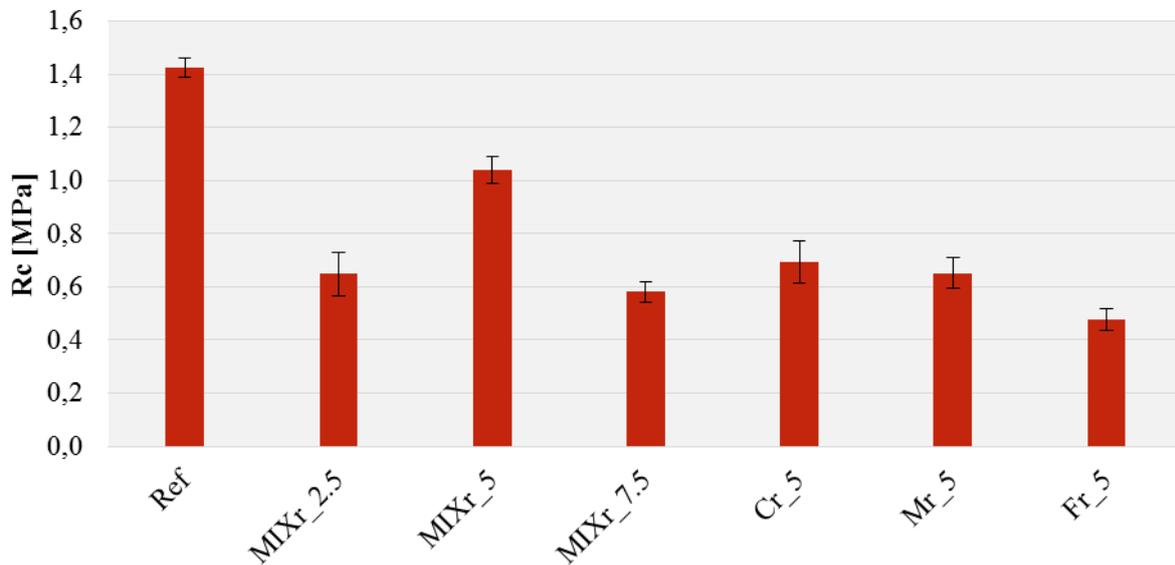


Figura 4.6 - Valores da resistência à compressão para as argamassas ensaiadas

Da análise da Figura 4.6 verifica-se que há uma diminuição acentuada dos valores da resistência à compressão quando comparadas com a referência. No entanto, verifica-se que a MIXr_5, embora com valores menores, não tem uma diminuição tão brusca como as demais.

Nota-se que das três misturas, a com valor nitidamente mais elevado é a MIXr_5, sendo seguida por MIXr_2,5 e por fim por MIXr_7,5. É também verificada uma diminuição da resistência com a diminuição do tamanho das partículas do resíduo.

4.3.4 Absorção de água por capilaridade

A análise de resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade traduz-se na elaboração de uma curva de capilaridade que contempla a quantidade de água absorvida com a raiz do tempo. A partir dessa curva é possível a obtenção de dois parâmetros distintos na realização deste ensaio: o coeficiente de capilaridade, CC, traduzindo este a velocidade com que a água é absorvida pelo provete; e o valor assintótico, VA, valor máximo de absorção de água ao longo do ensaio de capilaridade.

A Figura 4.7 apresenta a curva de absorção de água para os vários tipos de argamassa, sendo a Figura 4.8 um pormenor da fase inicial da mesma curva.

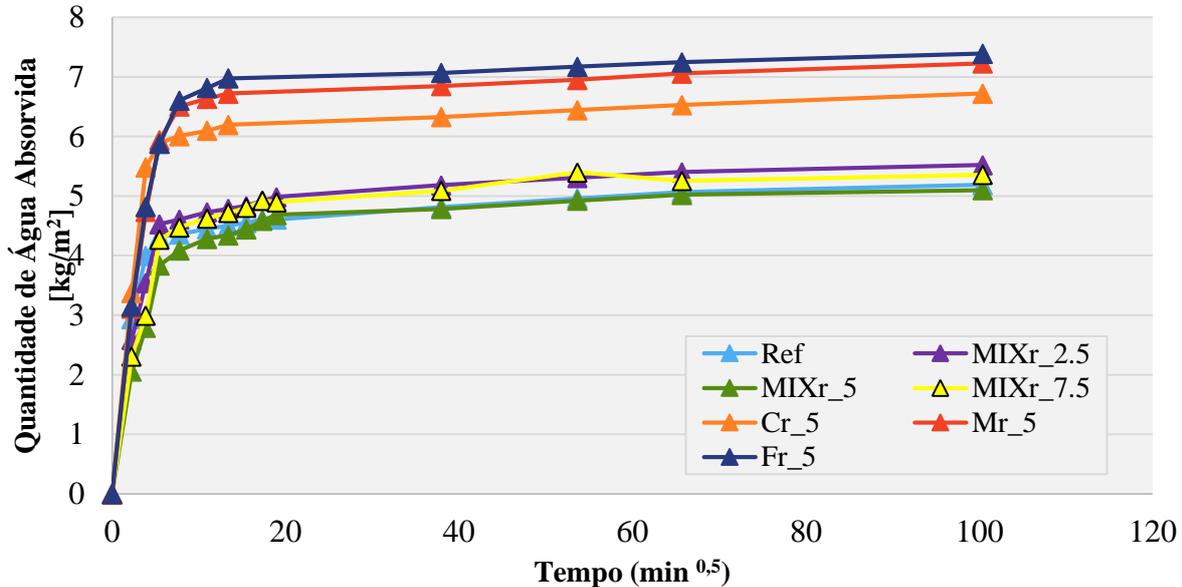


Figura 4.7 - Curva de absorção de água de todas as argamassas

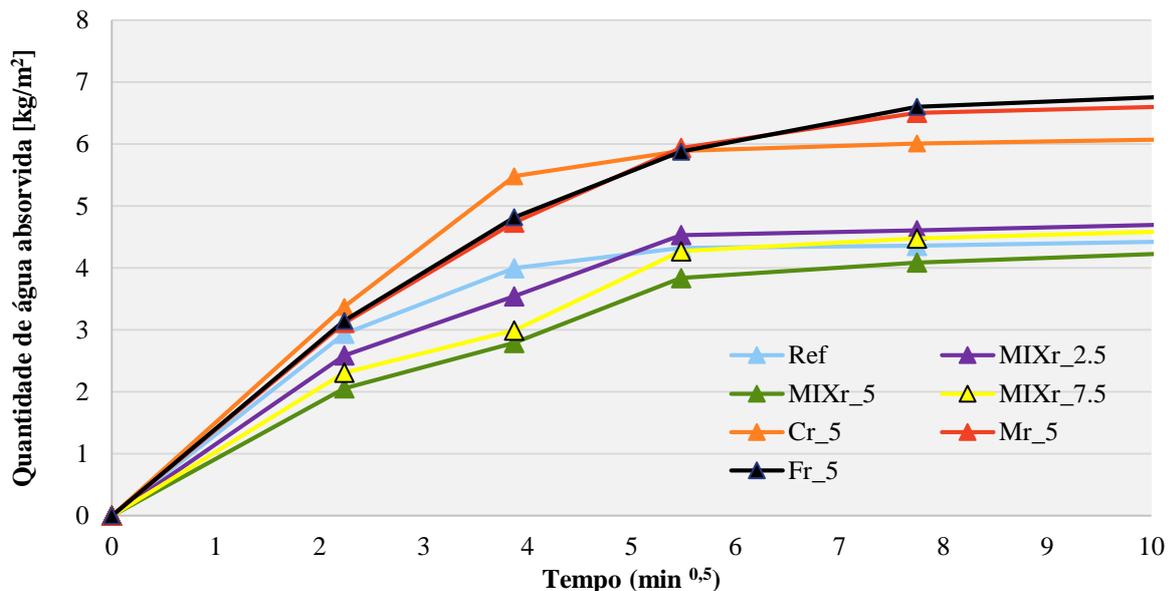


Figura 4.8 - Pormenor da fase inicial da curva de absorção de água

Ao analisar a Figura 4.8, constata-se que todas as argamassas absorvem uma quantidade total de água superior ao de referência com exceção de MIXr_5. As que apresentam valores mais elevados são a Fr_5, Mr_5 e Cr_5, o que indica que as argamassas com resíduo monogranular absorvem maior quantidade de água e que quanto menor é a dimensão das partículas de resíduo mais água é absorvida pela argamassa. Verifica-se também que MIXr_2,5 absorve um pouco mais água que MIXr_5 e que a MIXr_7,5. Da Figura 4.8 constata-se que o facto do resíduo de borracha a integrar nas argamassas ser mistura, provoca com que a absorção seja mais lenta. Por outro lado, Cr_5 é a argamassa que mais rapidamente absorve água. Uma das explicações possíveis é que esta argamassa contém partículas de borracha maiores permitindo assim

uma existência maior de vazios na argamassa. Mr_5 e Fr_5 absorvem praticamente à mesma velocidade. Estes últimos três tipos de argamassa apresentam maior velocidade de absorção inicial do que Ref, enquanto as argamassas com mistura de resíduo de borracha absorvem mais lentamente que Ref.

De realçar o facto particularmente positivo das argamassas com mistura granular de resíduo de borracha absorverem água mais lentamente que a argamassa de referência.

No Quadro 4.9 são identificados os valores médios e de desvio padrão de CC e VA, e na Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam-se a evolução dos mesmos.

Quadro 4.9 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico para os vários tipos de argamassa

Argamassa	CC [kg/(m ² .min ^{0,5})]		VA [kg/m ²]	
	Méd	DP	Méd	DP
Ref	1,05	0,11	5,19	0,54
MIXr_2.5	0,84	0,09	5,52	0,43
MIXr_5	0,72	0,12	5,10	0,80
MIXr_7.5	0,76	0,04	5,36	0,78
Cr_5	1,34	0,11	6,72	0,77
Mr_5	1,09	0,05	7,23	0,72
Fr_5	1,08	0,04	7,39	0,83

Tal como anteriormente referido, numa primeira análise aos valores de CC, nota-se que as argamassas com misturas de resíduo apresentam menores valores que as de referência, ao contrário das argamassas feitas só com cada fração granulométrica de resíduo. Verifica-se que, com a diminuição do tamanho das partículas de resíduo, menor é o valor de CC. Quanto aos valores de VA, todos os valores são superiores à referência, excetuando os valores de MIXr_5.

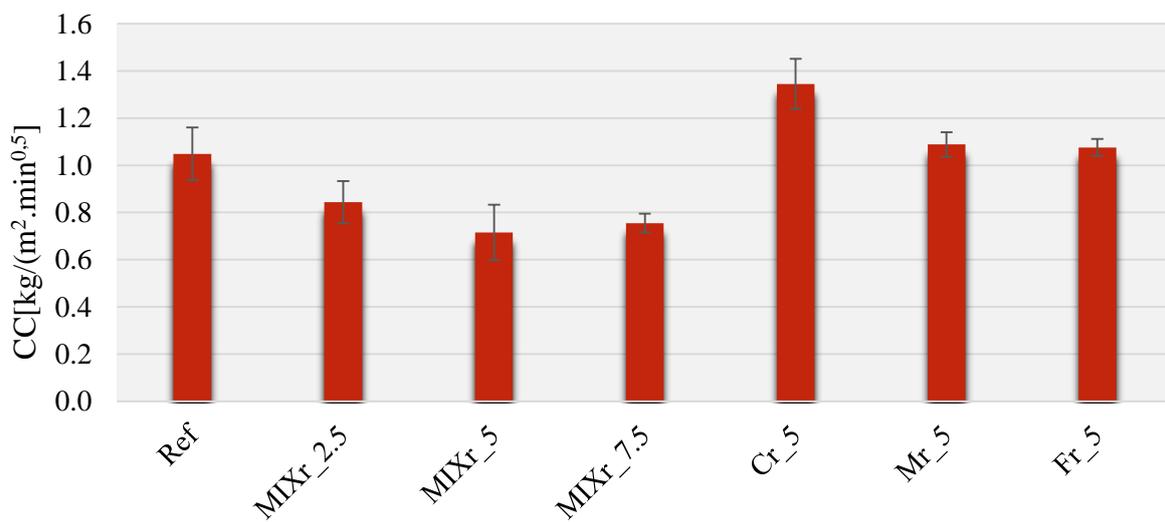


Figura 4.9 - Coeficiente de capilaridade de todas as argamassas

Para os valores de CC, os valores das misturas são todos inferiores à referência, sendo o de MIXr_5 o valor mais baixo de todas elas. Nota-se um aumento nas argamassas CR_5, Mr_5 e Fr_5, constatando-se que à diminuição do tamanho das partículas acompanha também uma diminuição do valor de CC.

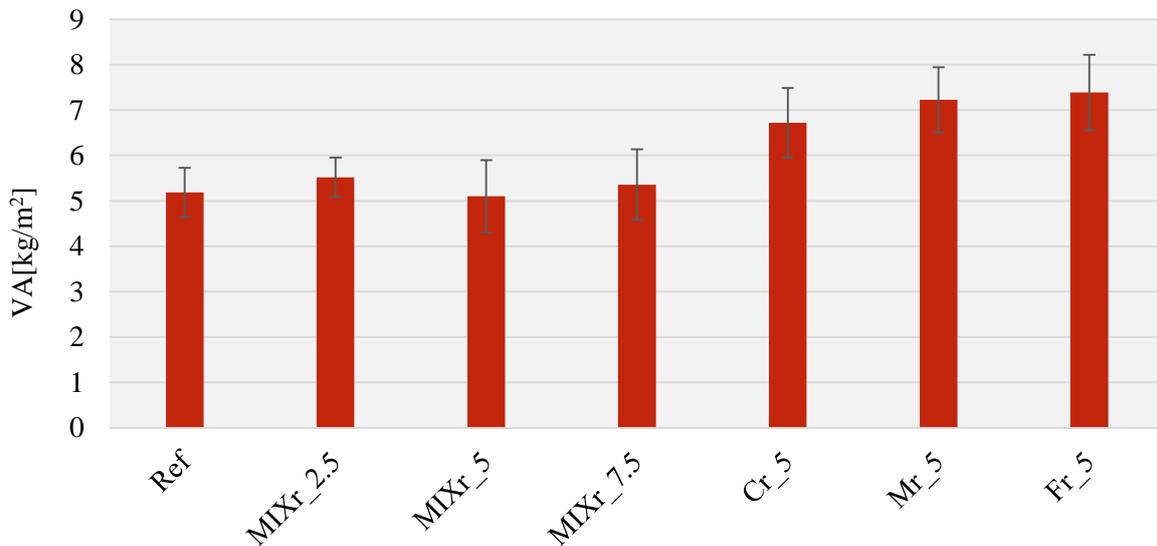


Figura 4.10 - Valor assintótico de todas as argamassas

Embora não se consiga tirar uma relação com a percentagem de borracha introduzida, pode-se deduzir que com a diminuição do tamanho das partículas de resíduo acompanha um aumento do valor de VA. O valor mais baixo é o de MIXr_5, o que apresentam uma mais-valia face à referência pois pretende-se que o valor de VA seja o mais baixo possível

4.3.5 Secagem

Analogamente ao ensaio de capilaridade, os resultados relativos ao ensaio de secagem traduzem-se em curvas de secagem que relacionam a quantidade de água que se evaporou do provete com o tempo. A partir das curvas é possível a obtenção de dois parâmetros distintos: a taxa de secagem, TS, que se traduz na velocidade de secagem da argamassa; e o índice de secagem, IS, que corresponde à secagem global da argamassa.

A Figura 4.11 designa as curvas de secagem obtidas para os tempos que todas elas têm em simultâneo. Como as amassaduras não foram todas realizadas no mesmo dia, houve alguma diferenciação com a leitura das pesagens para o ensaio. Numa primeira fase, o ensaio foi feito a Ref, MIXr_2,5, MIXr_5 e MIXr_7,5, sendo posteriormente feito a Cr_5, Mr_5 e Fr_5.

Para uma melhor compreensão da Figura 4.11, a Figura 4.12 ajuda a clarificar o resultado das curvas de secagem. Esta representa o ensaio até às 72 horas, e é possível notar que todas as argamassas quando comparadas à de referência apresentam maior capacidade de secagem que esta, pois têm uma variação superior.

As figuras 4.13 e 4.14 fazem uma análise individual de cada amassadura efetuada. Assim, nota-se que a argamassa que apresenta menores valores é a MIXr_2,5. Note-se que se inseriu a Ref na Figura 4.14 para título comparativo.

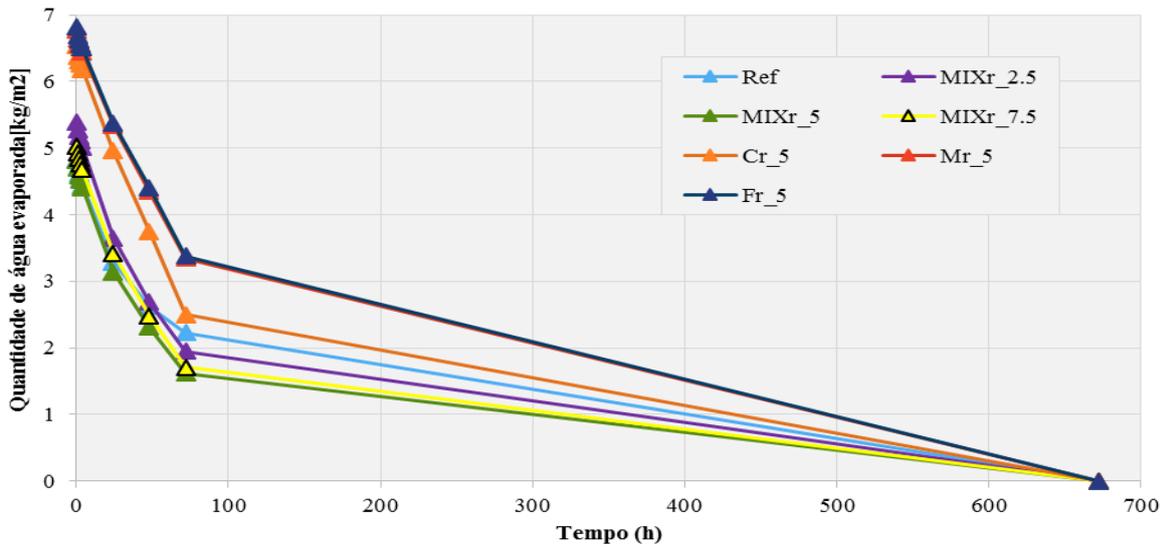


Figura 4.11 - Curvas de secagem para todas as argamassas

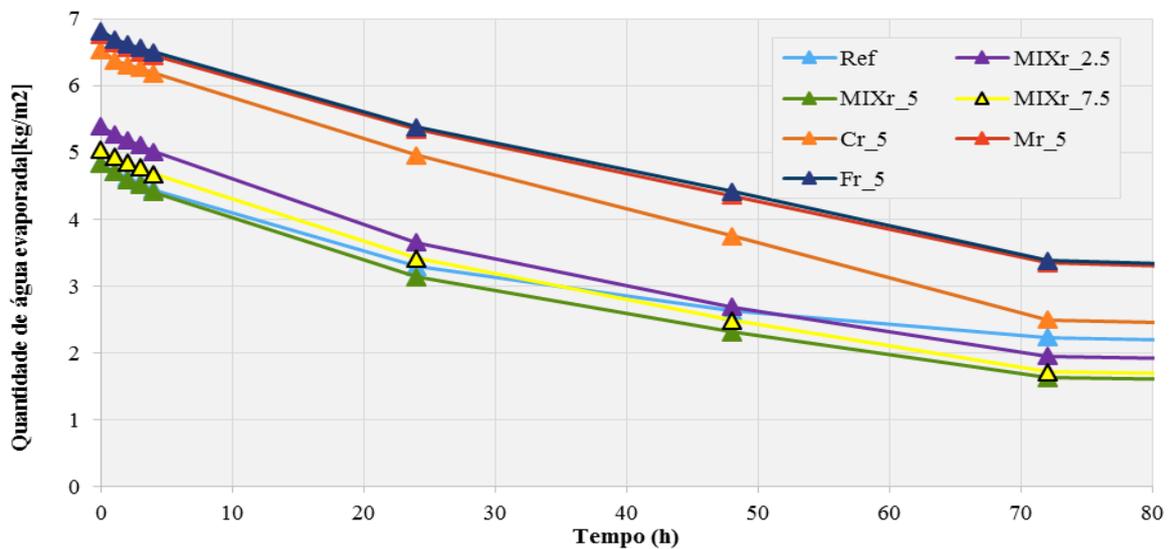


Figura 4.12 - Pormenor das curvas de secagem até às 72 horas de ensaio

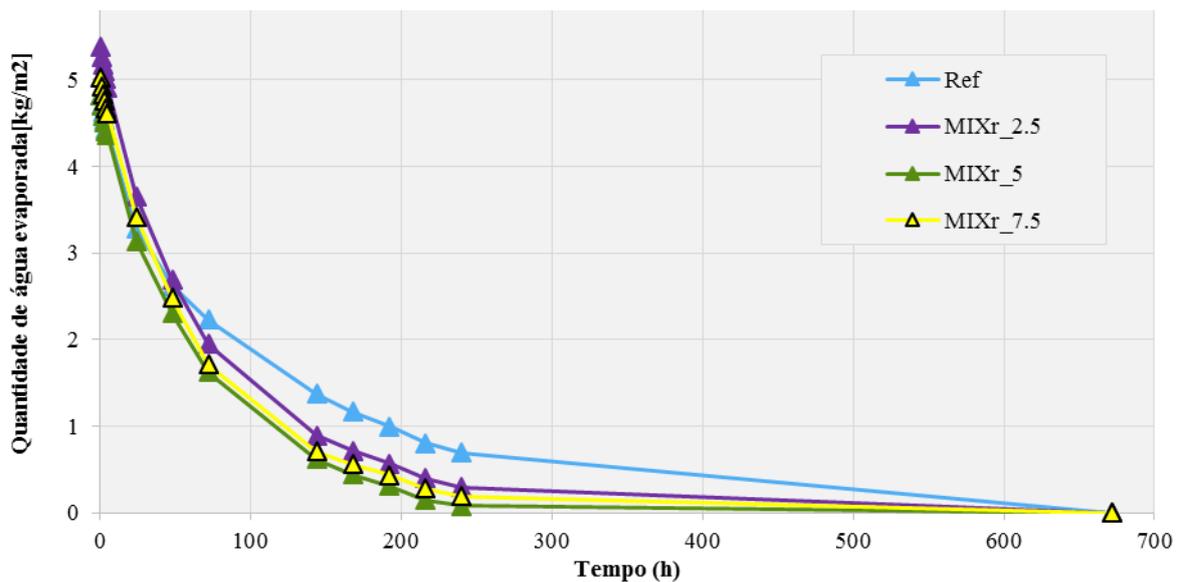


Figura 4.13 - Curvas de secagem para as argamassas com adição da mistura de resíduo de borracha, comparativamente à de referência

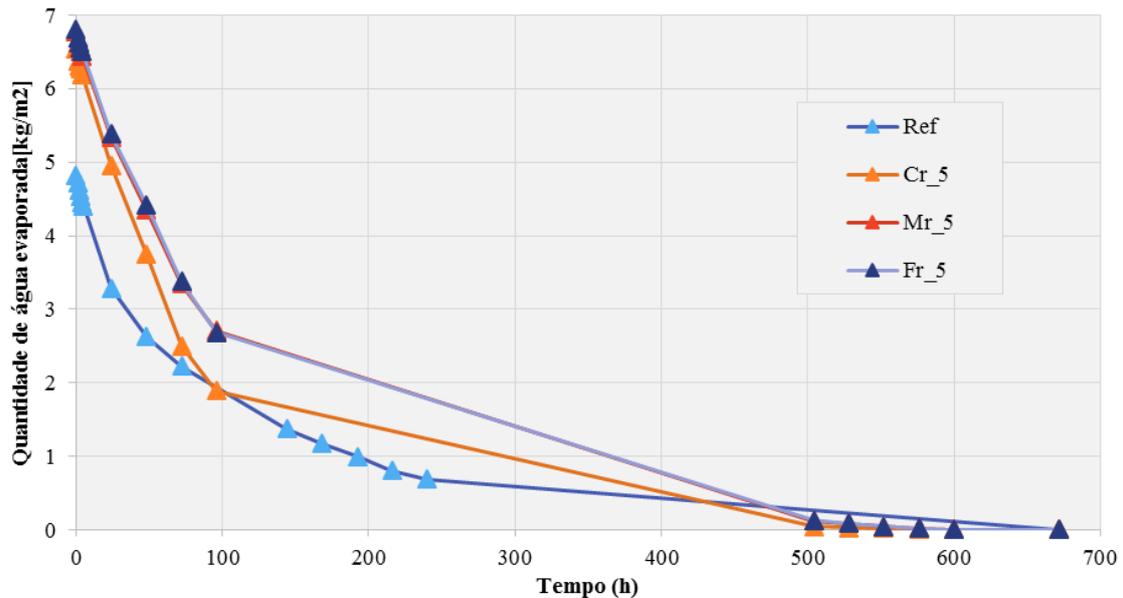


Figura 4.14 - Curvas de secagem das argamassas com adição de resíduo monogranular de borracha, comparativamente à de referência

No Quadro 4.10 são identificados os valores médios e de desvio padrão de TS e IS para as diferentes argamassas. Nota-se que para os valores de IS há um aumento gradual em todas as argamassas, tanto nas misturas como nas que caracterizam os grupos de resíduo de borracha. Isto significa que a capacidade de secagem diminui com a adição de resíduo de borracha, em mistura e particularmente em frações monogranulares, sendo tanto quanto mais fina a sua granulometria. Por sua vez, os valores de TS não oscilam muito.

Quadro 4.10 - Taxa de secagem e índice de secagem

Argamassa	TS [kg/(m².h)]		IS [-]	
	Méd	DP	Méd	DP
Ref	0.101	0.015	0.021	0.002
MIXr_2.5	0.107	0.011	0.023	0.007
MIXr_5	0.128	0.011	0.025	0.005
MIXr_7.5	0.120	0.014	0.031	0.005
Cr_5	0.137	0.025	0.037	0.004
Mr_5	0.106	0.012	0.038	0.002
Fr_5	0.105	0.018	0.042	0.002

Nas figuras 4.15 e 4.16 mostra-se o andamento de TS e IS para as diferentes argamassas. Verifica-se que os valores de TS são todos superiores à de referência, tendo estes uma diminuição que acompanha o decréscimo do tamanho das partículas de resíduo. Isto significa que a velocidade inicial da secagem é maior nas argamassas com resíduo comparativamente à de referência. Embora não haja uma relação direta nas misturas, constata-se que destas a que tem maior valor de TS é a MIXr_5, sendo seguida de MIXr_7,5 e de MIXr_2,5.

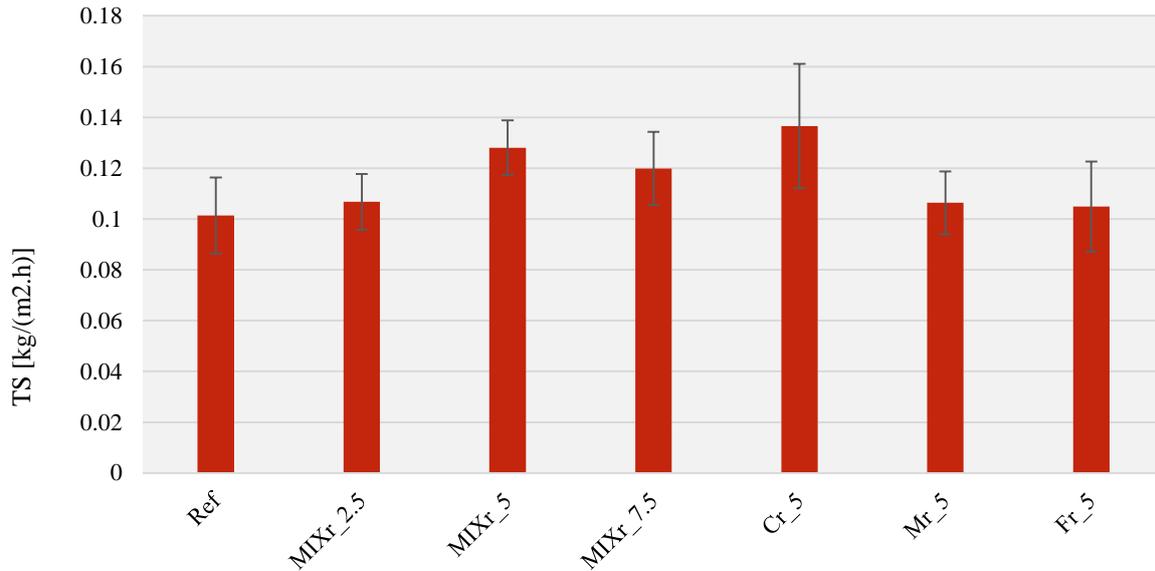


Figura 4.15 - Taxa de secagem para as diferentes argamassas

Por sua vez, os valores de IS são todos superiores à de referência, o que indica que, de uma maneira geral, todas as argamassas secam mais lentamente que a de referência. Verifica-se que nas misturas, os valores de IS aumentam com o aumento de percentagem de borracha adicionada. É também verificado que IS aumenta com a diminuição do tamanho das partículas de resíduo introduzido nas argamassas.

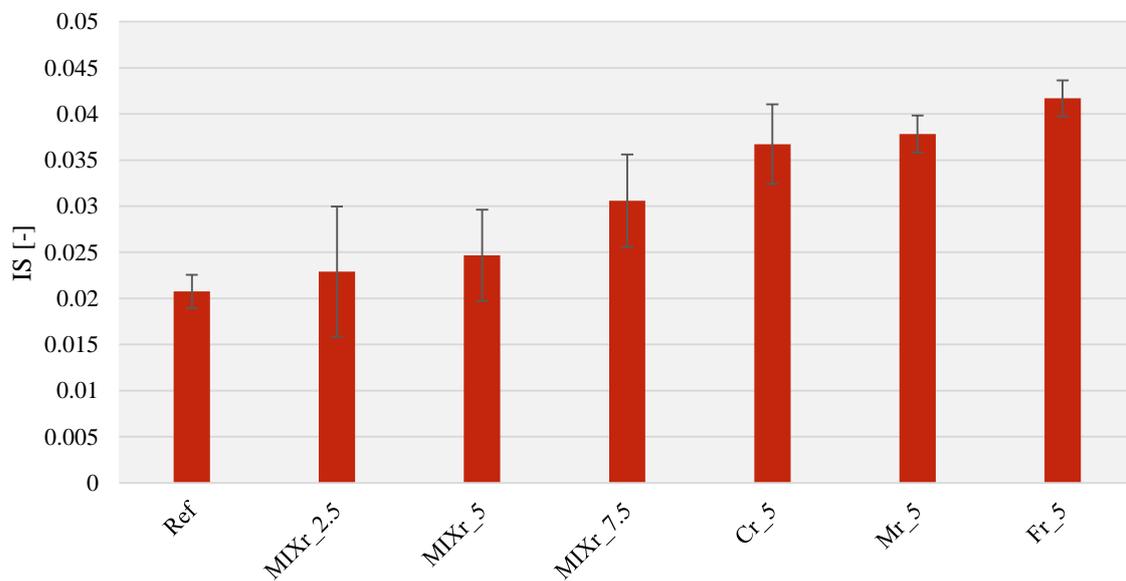


Figura 4.16 - Índice de secagem para as várias argamassas

4.3.6 Condutibilidade térmica

O Quadro 4.11 apresenta os valores médios e de desvio padrão do ensaio de condutibilidade térmica. A Figura 4.17 permite fazer uma avaliação evolutiva dos valores.

Quadro 4.11 - Condutibilidade térmica

Argamassa	λ [W/m.K]	
	Méd	DP
Ref	1.105	0.042
MIXr_2.5	0.831	0.004
MIXr_5	0.677	0.008
MIXr_7.5	0.669	0.008
Cr_5	0.856	0.006
Mr_5	0.709	0.007
Fr_5	0.653	0.008

Nota-se que os valores de λ são, em todas as argamassas, inferiores à de referência. É notável uma variação grande entre a mistura MIXr_2,5 e MIXr_5.

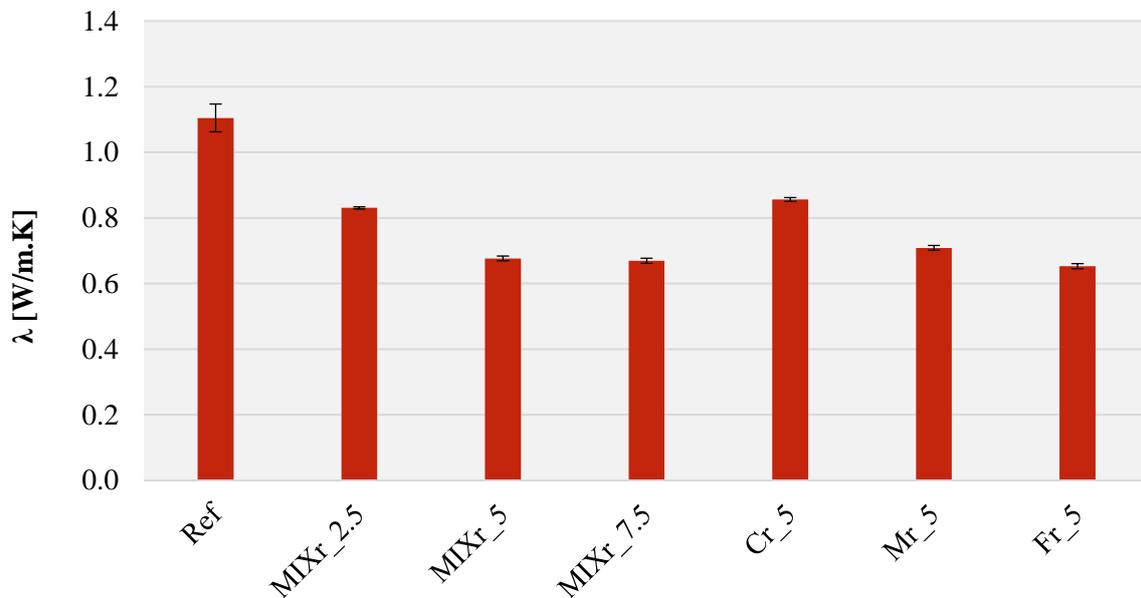


Figura 4.17 - Condutibilidade térmica de todas as argamassas

Da Figura 4.16 constata-se que a diminuição de λ acompanha o aumento da percentagem de borracha e acompanha a diminuição do tamanho das partículas de borracha. Dado que a borracha é um material resistente ao calor, esta característica é notável.

4.3.7 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

No Quadro 4.12 estão registados os valores médios e de desvio padrão da massa volúmica aparente e da porosidade aberta.

Nas figuras 4.18 e 4.19 apresenta-se o andamento dos valores de Pab e de MVA. Embora os valores de Pab não oscilem muito, os valores de MVA diminuem um pouco quando comparados com Ref. Esta diminuição acompanha o aumento de percentagem de borracha introduzida e a diminuição do tamanho das partículas de borracha.

Quadro 4.12 - Porosidade aberta e massa volúmica

Argamassa	Pab [%]		MVA [kg/m ³]	
	Méd	DP	Méd	DP
Ref	21,9	0,3	1924	4
MIXr_2.5	21,7	0,3	1788	12
MIXr_5	23,2	0,9	1657	52
MIXr_7.5	23,2	0,4	1653	6
Cr_5	23,4	0,6	1737	28
Mr_5	23,1	0,4	1709	9
Fr_5	23,3	0,3	1659	7

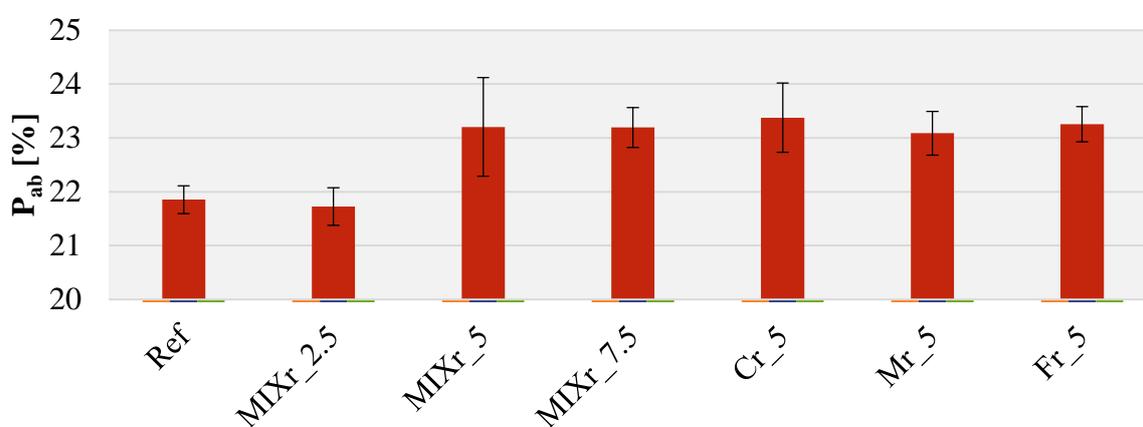


Figura 4.18 - Porosidade aberta para as diferentes argamassas

4.3.8 *Massa volúmica endurecida*

Na Figura 4.19 apresentam-se os valores da massa volúmica para o estado endurecido. Estes valores englobam os obtidos por cálculo geométrico (MV Geométrica) e obtidos pelo ensaio de porosidade aberta.

Como se pode observar, o andamento destes resultados é semelhante ao obtido durante o estado fresco (Figura 4.3). Verifica-se que com o aumento de percentagem de resíduo introduzido nas argamassas, a sua massa volúmica diminui. Por sua vez, a massa volúmica também diminui com a diminuição de fração granulométrica, embora esta variação não seja muito acentuada.

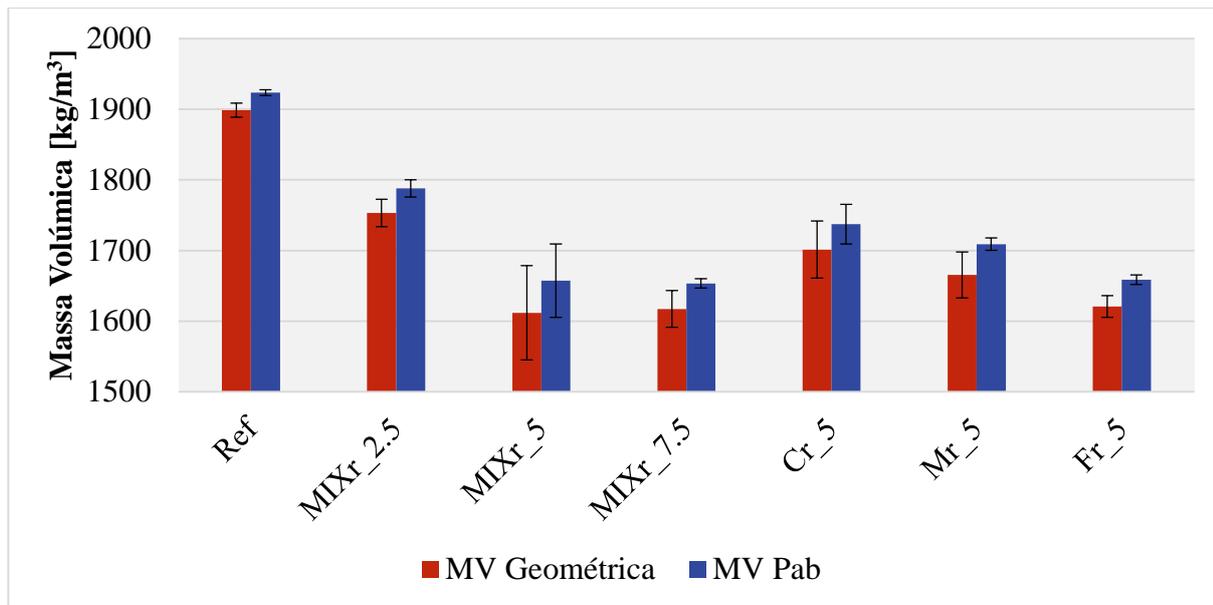


Figura 4.19 - Massa volúmica por cálculo geométrico e pelo ensaio de porosidade aberta

4.3.9 Permeabilidade ao vapor de água

No Quadro 4.13 e Quadro 4.14 estão representados os resultados obtidos do ensaio de permeabilidade ao vapor de ar. Verifica-se que todas as argamassas com incorporação de borracha apresentam valores de resistência à difusão do vapor de água inferiores a Ref. Parece haver uma tendência proporcional à percentagem de resíduo em mistura e relacionada com a fração granulométrica, uma vez quanto mais finas são as partículas de borracha, menor é a resistência à difusão.

Observa-se que os valores são um pouco elevados.

Quadro 4.13 – Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de ar

Argamassa	G [kg/s]		g [kg/m ² .s]		Wp [kg/m ² .s.Pa]		δp [kg/m.s.Pa]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
Ref	6,60E-09	2,31E-09	1,04E-06	3,63E-07	6,16E-10	2,16E-10	1,23E-11	4,31E-12
MIXr_2.5	6,36E-09	5,22E-10	1,00E-06	8,21E-08	5,94E-10	4,87E-11	1,19E-11	9,75E-13
MIXr_5	7,30E-09	9,72E-10	1,15E-06	1,53E-07	6,82E-10	9,07E-11	1,36E-11	1,81E-12
MIXr_7.5	6,85E-09	4,41E-10	1,08E-06	6,94E-08	6,40E-10	4,12E-11	1,28E-11	8,24E-13
Cr_5	7,33E-09	9,87E-10	1,15E-06	1,55E-07	6,84E-10	9,21E-11	1,37E-11	1,84E-12
Mr_5	8,10E-09	1,41E-09	1,27E-06	2,21E-07	7,56E-10	1,31E-10	1,51E-11	2,63E-12
Fr_5	8,50E-09	6,52E-10	1,34E-06	1,03E-07	7,93E-10	6,09E-11	1,59E-11	1,22E-12

Quadro 4.14 – Resistência à difusão e espessura da camada equivalente

Argamassa	μ		Sd [m]	
	Méd	DP	Méd	DP
Ref	16,88	4,91	0,34	0,10
MIXr_2.5	16,41	1,35	0,33	0,03
MIXr_5	14,39	1,81	0,29	0,04
MIXr_7.5	15,20	0,95	0,30	0,02
Cr_5	14,34	1,88	0,29	0,04
Mr_5	13,12	2,51	0,26	0,05
Fr_5	12,27	0,90	0,25	0,02

4.3.10 Porosimetria de mercúrio

Na figura 4.20 está representado o gráfico que foi obtido através do ensaio de porosimetria de mercúrio. Uma vez que o ensaio acarreta custos elevados e é moroso, decidiu fazer-se somente à mistura que apresentou melhores resultados, MIXr_5, e à Ref para se poder comparar.

Analisando a Ref, constata-se que a argamassa tem uma gama principal de poros, de dimensões entre os 1 μm e os 2 μm .

Quanto à MIXr_5, tem duas gamas principais de poros. A primeira com dimensões entre os 1 μm e os 2 μm , a segunda entre os 80 μm e os 100 μm . Salienta-se ainda a existência de uma gama entre os 4 μm e os 10 μm que pode dever-se a ajustamentos devido à compressibilidade do resíduo de borracha devido à pressão.

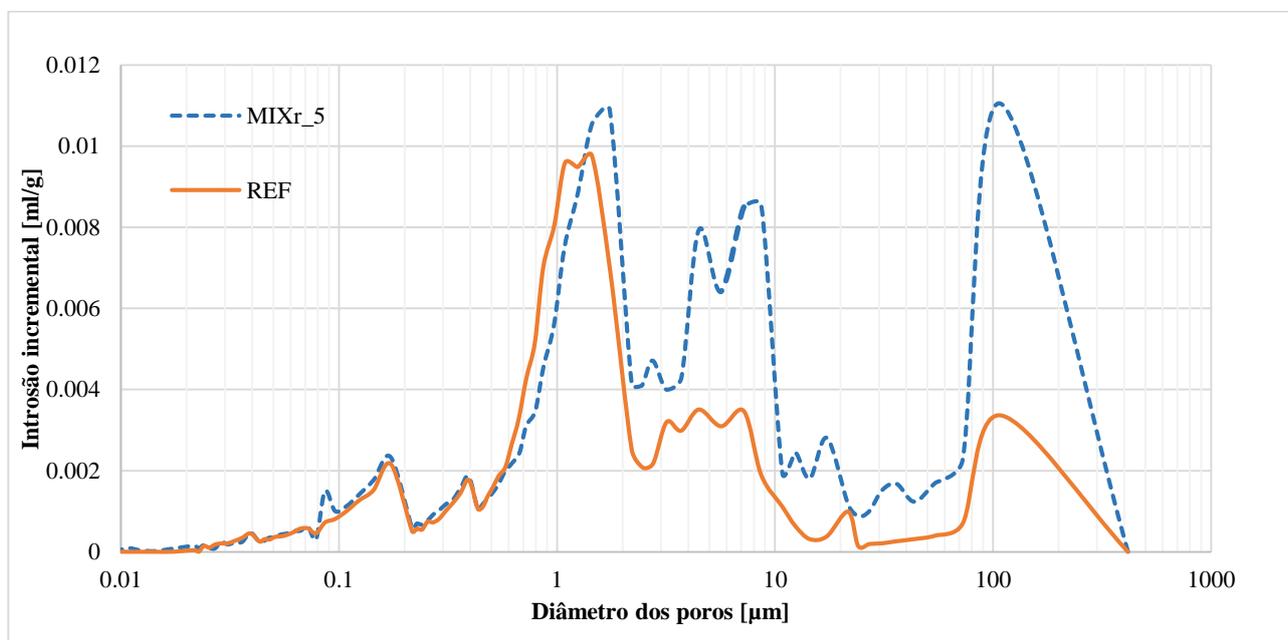


Figura 4.20 – Diâmetro dos poros para Ref e MIXr_5

Relativamente à Ref atinge-se um valor máximo de cerca de 0,0098 ml/g em poros com diâmetro de cerca de 1,3 μm . Na MIXr_5 atingem-se valores máximos de 0,011 ml/g com poros de 1,5 μm e 120 μm .

4.4 Discussão dos resultados

4.4.1 Síntese global dos resultados obtidos

De forma a justificar o comportamento das argamassas ensaiadas, neste capítulo efetua-se uma análise correlativa de vários ensaios. No Quadro 4.15 apresenta-se um resumo de valores.

Quadro 4.15 - Síntese global dos resultados

Argamassa	Espalhamento [mm]		Penetrómetro [mm]	Retenção de água [%]		Teor de ar [%]		
	Méd	DP		Méd	DP			
Ref	166	1	15	81,0	0,3	-		
MIXr_2.5	172	2	17	82,4	0,5	-		
MIXr_5	167	0	16	80,8	0,6	5,5		
MIXr_7.5	170	1	12	80,1	1,0	-		
Cr_5	171	1	18	76,7	1,3	7,0		
Mr_5	173	2	16	80,7	0,3	6,3		
Fr_5	169	0	18	81,4	0,3	7,8		
Argamassa	Ed [Mpa]		Rt [Mpa]		Rc [Mpa]		CC [kg/(m ² .min ^{0.5})]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
Ref	4773	170	0.49	0.05	1.42	0.04	1.05	0.11
MIXr_2.5	3613	154	0.38	0.02	0.65	0.08	0.84	0.09
MIXr_5	2291	284	0.27	0.04	1.04	0.05	0.72	0.12
MIXr_7.5	2027	392	0.23	0.02	0.58	0.04	0.76	0.04
Cr_5	2562	140	0.27	0.05	0.69	0.08	1.34	0.11
Mr_5	2380	140	0.24	0.04	0.65	0.06	1.09	0.05
Fr_5	1788	245	0.20	0.02	0.47	0.04	1.08	0.04
Argamassa	VA [kg/m ²]		TS [kg/(m ² .h)]		IS [-]		λ [W/m.K]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
Ref	5.19	0.54	0.101	0.015	0.021	0.002	1.105	0.042
MIXr_2.5	5.52	0.43	0.107	0.011	0.023	0.007	0.831	0.004
MIXr_5	5.10	0.80	0.128	0.011	0.025	0.005	0.677	0.008
MIXr_7.5	5.36	0.78	0.120	0.014	0.031	0.005	0.669	0.008
Cr_5	6.72	0.77	0.137	0.025	0.037	0.004	0.856	0.006
Mr_5	7.23	0.72	0.106	0.012	0.038	0.002	0.709	0.007
Fr_5	7.39	0.83	0.105	0.018	0.042	0.002	0.653	0.008
Argamassa	μ		Sd [m]		Pab [%]		MVA [kg/m ³]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
Ref	16,88	4,91	0,34	0,10	21,9	0,3	1924	4
MIXr_2.5	16,41	1,35	0,33	0,03	21,7	0,3	1788	12
MIXr_5	14,39	1,81	0,29	0,04	23,2	0,9	1657	52
MIXr_7.5	15,20	0,95	0,30	0,02	23,2	0,4	1653	6
Cr_5	14,34	1,88	0,29	0,04	23,4	0,6	1737	28
Mr_5	13,12	2,51	0,26	0,05	23,1	0,4	1709	9
Fr_5	12,27	0,90	0,25	0,02	23,3	0,3	1659	7

4.4.2 Análise à argamassa no estado fresco

A adição de resíduos de borracha em argamassas torna-as mais leves, como apontam os resultados da massa volúmica. A forma das partículas afeta a massa volúmica, uma vez que, caso sejam maiores, ao ocuparem um volume maior a massa volúmica é reduzida. Por sua vez, a quantidade de água na formulação das argamassas não foi a mesma, o que é condição pois a argamassa ao ter menos água tem menos massa no seu conjunto, e conseqüentemente, uma menor massa volúmica.

A Figura 4.21 relaciona o espalhamento de cada amassadura com a relação água/borracha. Nota-se que as argamassas que têm menos água têm um espalhamento mais baixo associado. No entanto isso não é problemático, uma vez que os valores de espalhamento não se afastam muito entre si.

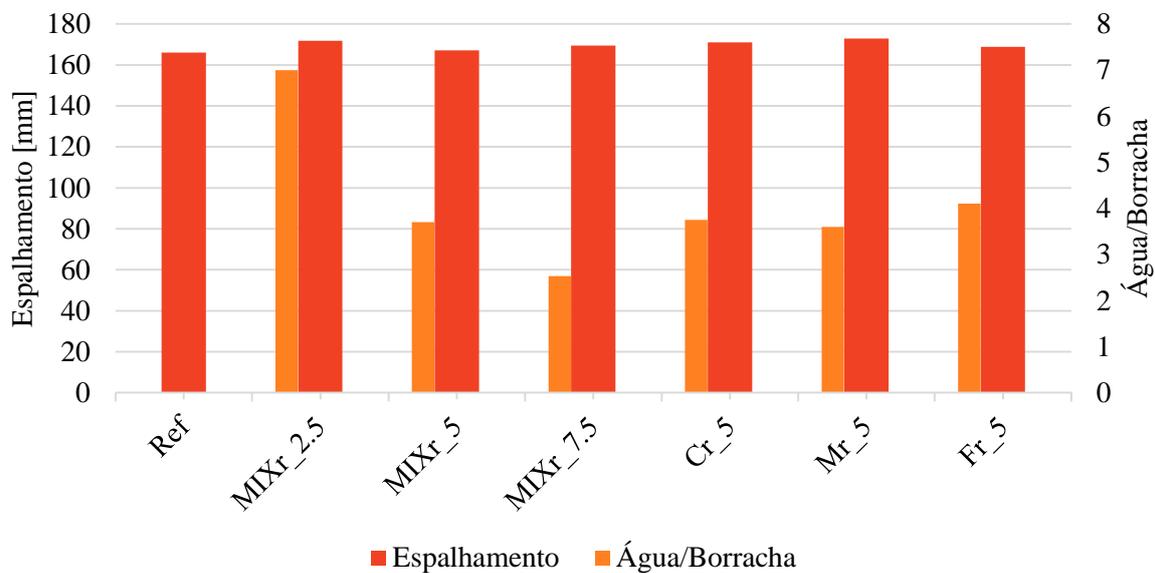


Figura 4.21 – Comparação entre o espalhamento e a relação água/borracha

4.4.3 Análise às resistências mecânicas e módulo de elasticidade

As resistências e os módulos de elasticidade são valores que estão sempre relacionados. Como tal, a Figura 4.22 ilustra a sua relação com os valores obtidos da campanha experimental efetuada. Da sua

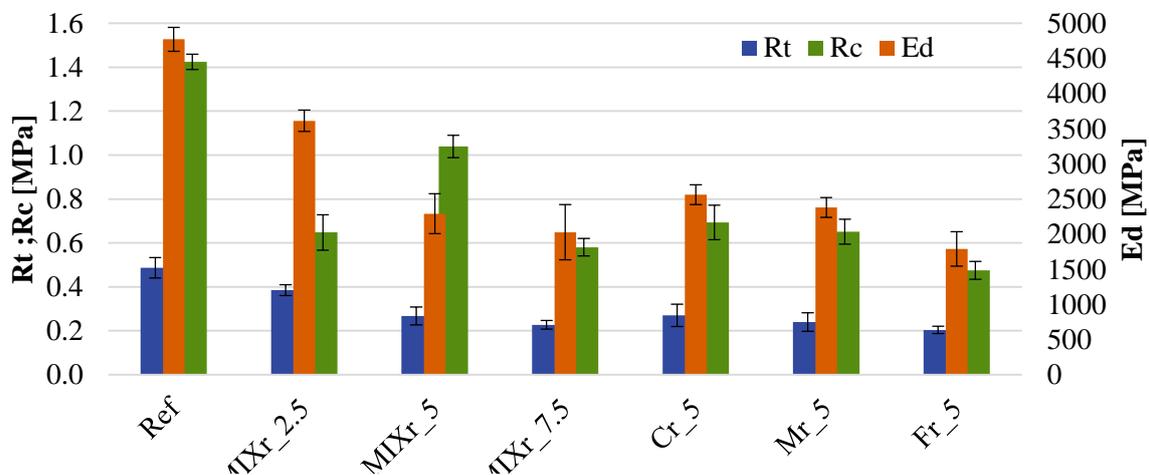


Figura 4.22 – Relação entre os ensaios mecânicos efetuados às argamassas

análise, verifica-se que à partida o seu andamento tem a mesma tendência à exceção da argamassa MIXr_2.5, que tem um valor de resistência à compressão demasiado baixo para o valor de módulo de elasticidade obtido. Ao analisar as misturas com resíduo de borracha, constata-se que de todas a MIXr_5 é a mistura que tem melhores características mecânicas, pois é mais deformável e mais resistente. A sua resistência à tração por flexão é mais baixa que a MIXr_2.5, mas a diferença não é muito considerável.

Tendo em conta os valores obtidos de massa volúmica no estado endurecido, a redução da mesma está implícita a uma redução do valor de Rt. Estas apresentam a mesma tendência, decrescem com o aumento percentual de resíduo e decrescem também com o aumento da granulometria do resíduo.

4.4.4 *Análise do comportamento face à água*

Nas argamassas formuladas, o seu comportamento face à água foi estudado através dos ensaios de capilaridade, de secagem e de permeabilidade ao vapor de água. O ideal é que a argamassa absorva o menos possível de água e que a liberte rapidamente e a um fluxo constante. Por outro lado deve ser impermeável à água mas permeável ao vapor de água.

Da análise dos valores obtidos nos ensaios de capilaridade e secagem, depreende-se que as argamassas com incorporação da mistura de resíduo têm um melhor comportamento face à água que as restantes. Os seus valores de CC, VA e IS são mais baixos do que as argamassas com resíduo da mesma granulometria e apresentam valores mais altos de TS. Isso mostra que uma granulometria mais extensa por parte do agregado introduzido concede à argamassa um melhor comportamento face à água. Os valores de VA e IS não acompanham uma tendência regular nas argamassas com mistura, onde VA é menor para a MIXr_5 e tem o maior valor para MIXr_2,5; IS por outro lado diminui com o aumento de percentagem de resíduo. Nas formulações de argamassa referentes a cada grupo de granulometria, nota-se que Cr_5 é a argamassa que apresenta melhores características, uma vez que tem valores de VA e IS inferiores face às restantes.

Os valores de resistência à difusão não se relacionam diretamente com os valores de porosidade aberta, pois não acompanham nenhuma tendência, mesmo que a porosidade não apresente grandes variações nas argamassas produzidas. Contudo, nota-se um decréscimo de μ nas argamassas produzidas face à Ref.

4.4.5 *Verificação dos parâmetros de classificação de argamassas*

Existem valores normalizados de requerimentos impostos às argamassas consoante a sua aplicação. A norma EN 998-1:2010 (IPQ, 2010) classifica assim as argamassas para rebocos interiores e exteriores por categorias consoante as suas características, mais propriamente quanto aos valores de Rc e CC. A norma estabelece mais parâmetros, incluindo a condutibilidade térmica para argamassas classificadas como de isolamento térmico, mas aqui estão apenas expressos aqueles que foram estudados, estando estes valores representados no Quadro 4.16.

A representação dos valores de Rc e CC das argamassas estudadas com os valores normalizados está representado na Figura 4.23. Depreende-se que todas as argamassas são classificadas como CS I quanto ao Rc e W0 quando a CC.

Quadro 4.16 – Parâmetros de aplicação das argamassas, segundo EN 998:1-2010 (CEN, 2010)

Rebocos para alvenarias (interiores e exteriores)		
Propriedades	Categorias	Valores
Resistência à compressão aos 28 dias	CS I	0,4 – 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 – 5 N/mm ²
	CS III	3,5 – 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6 N/mm ²
Coeficiente de absorção capilar	W0	Não especificado
	W1	≤ 0,40 kg/m ² .min ^{0,5}
	W2	≤ 0,20 kg/m ² .min ^{0,5}

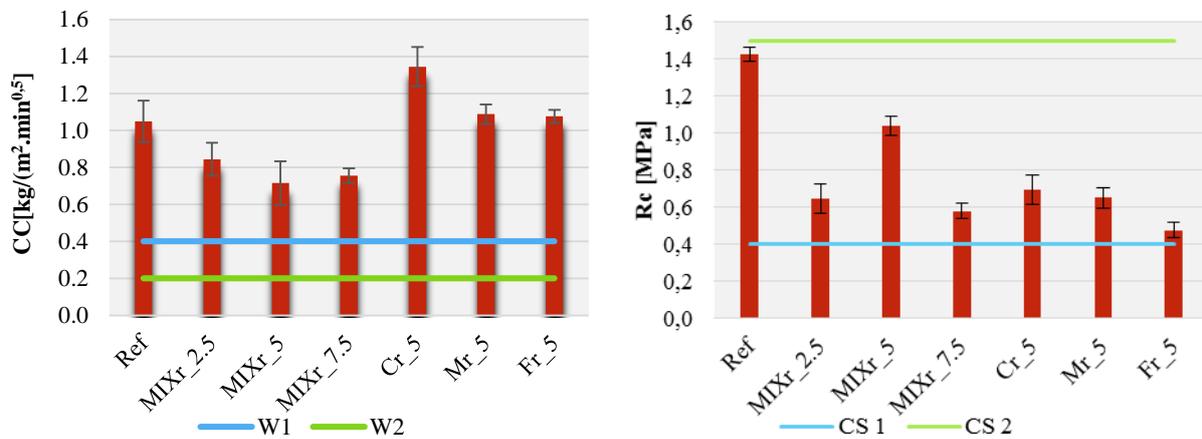


Figura 4.23 – Verificação das condições de EN 998:1-2000 (CEN,2000)

4.5 Apreciação do comportamento das argamassas

Após a análise feita às argamassas com a presença de resíduo de borracha produzidas para o presente trabalho, é agora possível fazer uma apreciação geral dos seus comportamentos. Quanto às características mecânicas, a argamassa que mais se destaca é a MIXr_5, pois apresenta valores mais elevados de Rc que as restantes, é mais deformável para os valores de Rt e Rc que apresenta. Este fator aliado a esta ter valores de massa volúmica mais baixo do que Ref, e ser mais porosa também, mostra o seu bom comportamento mecânico.

Relativamente à capilaridade, novamente a MIXr_5 é a que melhor comportamento tem, pois de todas é a que menos água absorve, devido ao seu baixo valor de VA, e mais lentamente, por ter o valor mais baixo de CC. Na secagem, a situação muda sendo a Cr_5 a que mais rápido inicia a secagem, tendo o valor de TS mais elevado, muito devido à existência de partículas de resíduo de maior dimensão que criam poros maiores. A que mantém a secagem de maneira mais contínua é a MIXr_2,5, a que tem o valor de IS mais

baixo, pois tem uma constituição mais parecida a Ref (sendo esta a que do conjunto mais rápido inicia o processo de secagem)

Em termos de condutibilidade térmica, o expectável seria que a argamassa que mais resíduo tivesse ou que mais volume ocupasse, menor o valor de λ teria. Tal não aconteceu, sendo a MIXr_5 e a Fr_5 as que mais baixo valor apresentam.

Quanto a outros autores que desenvolveram trabalhos sobre argamassas com incorporação de resíduos de borracha, cujos ensaios e respetivos procedimentos são semelhantes aos desenvolvidos no presente texto, é de destacar o de Pedro (2011). O seu estudo envolveu a substituição de areia por resíduo de borracha em argamassas de cimento, em proporção da massa.

No Quadro 4.17 apresenta-se a comparação de resultados possíveis entre os obtidos por Pedro (2011) e os do presente trabalho. As dosagens não foram feitas de igual modo nos dois trabalhos, sendo a comparação feita para as argamassas com 0% e 5% de incorporação de mistura de resíduo de borracha. Por sua vez, a mistura com adição de resíduo a 7,5 % foi comparada a uma mistura com 10% de resíduo de borracha.

Quadro 4.17 - Comparação de resultados entre Pedro, (2011) e os obtidos na campanha experimental

		Argamassas		
Ensaio	Autores	0 %	5 %	10%/7,5%
MV Fresco (kg/m ³)	Pedro, 2011	1942	1861	1802
	Piteira	2073	1863	1816
MV Endurecido (kg/m ³)	Pedro, 2011	1759	1682	1627
	Piteira	1898	1612	1701
Ed (MPa)	Pedro, 2011	7,97	7,03	5,72
	Piteira	4,77	2,29	2,03
Rt (MPa)	Pedro, 2011	1,26	1,11	1,36
	Piteira	0,49	0,27	0,23
Rc (MPa)	Pedro, 2011	4,22	3,84	2,73
	Piteira	1,42	1,04	0,58
CC kg/(m ² .min ^{0,5})	Pedro, 2011	1,07	0,97	1,14
	Piteira	1,05	0,72	0,76

É possível constatar que, embora as diferenças óbvias dos dois tipos diferentes de argamassa relativas ao ligante utilizado, as argamassas têm evoluções semelhantes em termos de ordem de grandeza. A massa volúmica, tanto no estado fresco como no endurecido, não apresenta grandes discrepâncias e em ambos os casos diminui com o aumento de percentagem de resíduo de borracha na argamassa.

Em termos de resistências mecânicas, os valores obtidos são inferiores a Pedro, uma vez que o ligante utilizado por este (cimento) confere às argamassas maior resistência mecânica. Porém, os resultados do presente trabalho acompanham a sua tendência.

Por fim, quanto aos valores de CC, a tendência mantém-se, diminuindo de 0% para 5% e aumentando ligeiramente para maiores percentagens de resíduo introduzido nas argamassas.

5 Conclusões

5.1 Considerações finais

Hoje em dia, e cada vez mais, é importante ter a noção que os pneus são uma fonte importante de resíduos devido ao crescimento da indústria automóvel, constituindo cada vez mais um problema para o ambiente. Devido ao processo de vulcanização a que a borracha é sujeita, torna-se difícil reaproveitar os constituintes originais do pneu, sendo por isso, a reciclagem de pneus usados uma tarefa complexa. Criaram-se aterros ao ar livre, que são um risco para o ambiente e para a saúde humana. Estas práticas têm vindo a ser condenadas por inúmeros motivos, entre os quais propagação de doenças, cheias, contaminação do solo e do lençol freático. No entanto por vezes é difícil saber qual é a melhor solução a dar a estes resíduos.

Em Portugal, existe o Decreto-Lei n.º 111/2001 [DL 1] com o objetivo de prevenir a acumulação destes resíduos, assim como promover a recauchutagem, a reciclagem e outras formas de valorização. Por outro lado, é importante haver uma preocupação de vários setores, sendo aí que se insere o propósito desta dissertação. A incorporação de resíduos da recauchutagem de pneus na construção é, em tudo, uma mais-valia, uma vez que, além de se estar a valorizar e utilizar resíduos, está-se também a economizar na produção de argamassas, betões ou betonilhas através do aumento dos volumes produzidos com igual consumo de outros materiais.

A análise granulométrica feita à borracha foi preponderante; através dela constituíram-se três frações granulométricas de resíduos: grossa Cr, média Mr e fina Fr. Formularam-se argamassas com uma mistura das três frações de resíduo, sendo a sua quantidade referente à percentagem de resíduo encontrada de cada fração. As argamassas foram feitas com adição de 2,5%, 5% e 7,5% de resíduo em relação à massa de areia.

Todos os ensaios e procedimentos laboratoriais foram rigorosos, seguindo as especificações das normas ou fichas de ensaio, com exceção de:

- No ensaio de teor de ar, o equipamento avariou-se a meio das amassaduras e não foi possível proceder à sua realização para as argamassas Ref, MIXr_2,5 e MIXr_7,5;
- No ensaio de permeabilidade ao vapor de ar, o ensaio entende que os provetes sejam colocados a 50% de humidade relativa, e foram colocados a 40%;

Foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido às argamassas produzidas. Em termos de espalhamento, durante o processo de amassadura notou-se que a inclusão de borracha piora a trabalhabilidade e foi necessário adicionar mais água. Da análise feita, os resultados mostram que a incorporação de agregados de borracha de pneus usados em argamassas implica uma diminuição significativa na resistência à compressão e à tração por flexão. Verifica-se também uma descida do módulo de elasticidade dinâmico. Desta forma, e visto que em argamassas de revestimento a resistência não é uma prioridade acima de determinados níveis, estas características tornam podem contribuir para a durabilidade do material, no sentido de este ser menos rígido e poder acomodar um pouco melhor eventuais deformações

do suporte. A absorção de água parece não ser significativamente afetada, bem como a secagem. Nota-se também em todas as amostras ensaiadas uma melhoria em termos de condutibilidade térmica face à argamassa sem resíduos.

Comparando as argamassas utilizando apenas uma fração granulométrica de resíduo (que obrigaria, na indústria das argamassas industriais, à peneiração prévia do resíduo para separação em frações granulométricas) com as argamassas formuladas com a mistura de resíduo, verifica-se que estas últimas apresentam melhores características, o que é bastante positivo. De entre estas a argamassa com 5% de resíduo apresenta-se como a mais vantajosa.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Findo o trabalho, considera-se interessante a continuação de trabalhos no seguimento do tema abordado. Como se obtiveram resultados positivos no geral, era de todo o interesse a continuação de estudos que avaliassem as argamassas com melhor desempenho a idades mais avançadas, como a 90 ou 180 dias, bem como a sua caracterização após curas diferentes e eventualmente mais húmidas nas primeiras idades (Grilo et al., 2014). O complemento da caracterização das argamassas com melhor desempenho também era proveitoso, nomeadamente através de ensaio de reação ao fogo, ensaios de isolamento acústico, aprofundar o estudo sobre a microestrutura das argamassas, avaliar a reação a sulfatos, ensaios de toxicidade e lixiviação e ensaios de envelhecimento. Sugere-se também a aplicação dessas argamassas em aplicações em muretes que simulem suportes reais.

Referências Bibliográficas

Livros, artigos e teses

- Al, Akhras, N.; Smadi, M. (2004), “*Properties of tire ash mortar*”, *Cemente & Concrete Composites*, 26, 821-826.
- Basel Convention (1999), “*On the control of transboundary movements of hazardous wastes and their disposal – technical guidelines on hazardous wastes: Identification and management of used tyres*”
- Brás, A.; Leal, M.; Faria, P. (2013), “*Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance*”, *Construction and Building Materials*, 49, 315-327.
- Canova, J.; Bergamasco, R.; Neto, G. (2007), “*A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento*”, Programa de pós-graduação em Eng. Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 29 (2), 141-147.
- Choi, N.; Ohama, Y.(2004), “*Development and testing of polystyrene mortars using waste EPS solution-based binders*”; *Construction and Building Materials*, 18, 235-241.
- Cintra, C.; Paiva, A.; Baldo, J.(2014), “*Masonry mortars containing expanded vermiculite and rubber aggregates from recycled tires - relevant properties*”, *Cerâmica*, 60, 69-76.
- Collins, R.J.; Ciesielski, S.K.(1994), “*Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction*”, Synthesis of highway practice 199, TRB, National Research Council, Washington DC.
- Corinaldesi, V.; Mazzoli, A.; Moriconi, G.(2011), “*Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles*”, *Materials and Design*, 2011, 32, 1646-1650.
- Couto, J., & Moreira, N. (2007). “*Caracterização e exigências funcionais dos massames e argamassas de regularização*”. APFAC, Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa.
- Eiras, J.; Segovia, F.; Borrachero, M.; Monzó, J.; Bonilla, M.; Payá, J.(2014), “*Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires*”, *Materials and Design*, 59, 550-557.
- Ferrándiz-Mas, V.; Garcia-Alcoel, E.(2012), “*Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS)*”, *Materiales de Construcción*, 62 , 308, 547-566.
- Ferreira, C. (2009), “*Análise de Propriedades Térmicas e Mecânicas de Compósitos de Argamassa e Resíduo de Borracha*”, Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Agosto.
- Faria-Rodrigues, P. (2007), “*Argamassas para reabilitação: funções, constituintes e características*”. *Pedra&Cal*, . 4-7.
- Faria, P.; Piteira, R. (2015), “*NHL 3,5 Mortars with scrap tire rubber*”, 3rd European Mortar Organization Summit, Lisboa, 85-96.
- Gisbert, A.; Borrell, J.; García, F.; Sanchis, E.; Amorós, J.; Alcaraz, J.; Vicente, F.:(2014), “*Analysis behaviour of static and dynamic properties of Ethylene-Propylene-Diene-Methylene crumb rubber mortar*”, *Construction and Building Materials*, , 50, 671-682.
- Grilo, J.; Faria, P.; Veiga, R.; Santos-Silva, A.; Silva, V.; Velosa, A. (2014), “*New Natural Hydraulic Lime mortars - Physical and microstructural properties in different curing conditions*”. *Construction and Building Materials*, 54, . 378-384.

- Henriques, F.; Rodrigues, P. (2006), “*Argamassas de substituição na conservação do património*”, *Construção Magazine*, 16, Abril, 38-45.
- Herrero, S.; Mayor, P.; Hernandez-Olivares, F.(2012), “*Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars*”, *Materials and Design*, 47, 633-642.
- Hofmann, W. (1989), “*Rubber Technology Handbook*”, Hanser, New York.
- Hutchinson, G.L; Stranaghan, G.(1990), “*Rubber isolators for structures*”; *Concrete International*, 12(4), 57-5.
- IGAOT, (2007), Relatório temático sobre o resultado das inspeções a Indústrias de reconstrução de pneus, levado a cabo pela Inspeção-Geral do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- Kromer, S., Kreipe, E., Reichenbach, D., & Stark, R. (1999), “*Life Cycle Assessment of a Tire*.”
- Lima, I. S., Rocha F.S., Ferreira, J.B. (2000), “*Um estudo da argamassa de cimento com adição de fibras de borracha vulcanizada para a construção civil*”, *IBRACON*, 42, 20-41.
- Meneguini, E. (2003), “*Comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Merino, M.; Astorqui, J.; Cortina, M.(2007), “*Viability analysis and constructive applications of lightened mortar (rubber cement mortar)*”, *Construction and Building Materials*, 21, 1785-1791.
- Meshgin, P.; Xi, Y.; Li, Y.(2012), “*Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar*”, *Construction and Building Materials*, 28, 713-721.
- Nehdi, M.; Khan, A.(2001), “*Cementitious composites containing recycled tire rubber: an overview of engineering properties and potential applications*”, *Cement, Concrete and Aggregates Journal* 23(1), 3–10.
- Pedro, D. (2011), “*Desempenho de Argamassas Fabricadas com Incorporação de Materiais Finos Provenientes da Trituração de Pneus*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Setembro.
- Penas, F. (2008), “*Argamassas de cal hidráulica para revestimentos de paredes*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Raghavan, D. (1999), “*Study of rubber-filled cementitious composites*”, Polymer Science Division, Howard University, Washington DC.
- Raghavan, D.; Huynh, H.; Ferraris, C.F. (1998), “*Workability, Mechanical properties and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite*”; *Journal of Materials Science*, 33,1745-1752.
- Ramos, T.; Matos, A.; Sousa-Coutinho, J.(2014), “*Strenght and durability of mortar using cork waste ash as cement replacement*”; *Materials Research*, 17, 893-907.
- Rato, V. (2006), “*Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FCT-UNL.
- Reschner, K. (2008), “*Scrap tire recycling a summary of prevalent disposal and recycling methods*”, Berlim.
- Segre, N. (1999), “*Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento*”, Tese de Doutoramento em Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Agosto.
- Souza, F.; Junior, D. (2004), Silva, M.; Oliveira, M.; Vorwald, Herman; “*Mortar modified with rubber tire*”, International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures 8 – 11 November, Barcelona.

Turatsinze, A.; Bonnet, S.; Granju, J.L. (2005), “*Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres*”, Building and Environment, 40, 221-226.

Turki, M.; Bretagne, E.; Rouis, M.; Quéneudec, M. (2009), “*Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures*”, Construction and Building Materials, 23, 2715-2722.

Turki, M.; Zarrad, Inès.; Bretagne, E.; Quéneudec, M.(2012), “*Influence of filler addition on mechanical behaviour of cementitious mortar-rubber aggregates: experimental study and modeling*”, Journal of Materials in Civil Engineering, 24 (11), 1350-1358.

Yue, Li; Wang, Min; Zhanguo, L. (2010), “*Physical and mechanical properties of crumb rubber mortar with interfacial modifiers*”, Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 25 (3), 845-848.

Normas

IPQ (2000). *NP EN 933-1 – Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade;

IPQ (2002). *NP EN 1097-3 – Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade;

CEN (1998). *EN 1015-2 – Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels, European Committee for Standardization;

CEN (1999). *EN 1015-3 – Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*., Brussels, European Committee for Standardization;

CEN (1999). *EN 1015-11 – Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardener mortar*. Brussels, European Committee for Standardization;

CEN (2002). *EN 1015-18 – Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardener mortar*. Brussels, European Committee for Standardization;

CEN (2009). *EN 15801 – Conservation of cultural property - Test methods - Determination of absorption by capillarity*. Brussels, European Committee for Standardization;

CEN (2004), *EN 14146 – Natural stone test methods. Determination of dynamic elastic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency)*. Brussels;

CEN (2009), *EN 15801 – Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity*. Brussels;

CEN (2013), *EN 16322 – Conservation of cultural heritage. Test methods. Determination of drying properties*. Brussels;

CEN (1998/2006), *EN 1015-6/A1 - Methods of test for mortar for masonry. Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. Brussels;

CEN (1998), *prEN 1015-8 - Methods of test for mortar for masonry Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar*. Brussels;

CEN (2006), *EN 1936 – Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity*. Brussels.

CEN (2010a), EN 459-1:2010 – *Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria*. Brussels.

CEN (2010b), EN 998-1 - *Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar*. Brussels.

CEN (2010c), EN 998-2 – *Specification for mortar for masonry. Part 2: Masonry mortar*. Brussels.

Documentos legislativos

[DL 1] Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril;

[DL 2] Decreto-Lei nº 239/97, de 9 de Setembro;

[DL 3] Decreto-Lei nº 43/2004, de 2 de Março;

[DL 4] Diretiva nº1999/31/CE, do Parlamento e do Conselho, de 26 de Abril;

[DL 5] Diretiva nº 2008/98/CE, do Parlamento e do Conselho, de 19 de Novembro;

[DL 6] Decreto-Lei nº178/2006, de 5 de Setembro;

[DL 7] Portaria nº 209/2004, de 3 de Março;

[DL 8] Portaria nº 335/97, de 16 de Maio;

[DL 9] Diretiva nº 2000/53/CE, do Parlamento e do Conselho, de 18 de Setembro;

[DL 10] Decreto-Lei nº 196/2003, de 23 de Agosto;

[DL 11] Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto;

[DL 12] Decreto-Lei nº73/2011, de 17 de Junho.

Sítios na Internet

[SI 1] <http://www.michelin.pt> – Consultado pela última vez em 18 de Março de 2015

[SI 2] <http://www.valorpneu.pt> – Consultado pela última vez em 25 de Janeiro de 2015

[SI 3] <http://revista.fapemig.br> – Consultado pela última vez em 2 de Março de 2015

[SI 4] <http://www.continental-corporation.com> – Consultado pela última vez em 11 de Fevereiro de 2015

[SI 5] <http://5cidade.files.wordpress.com/2008/05/cal-hidraulica-natural.pdf> - Consultado pela última vez em 17 de Fevereiro de 2014

ANEXOS

Anexo – Resultados individuais dos ensaios

Quadro A-0.1 - Espalhamento de cada argamassa

Argamassa	Espalhamento [mm]			
	Esp 1	Esp 2	Méd	DP
Ref	167	165	166	1
MIXr_2.5	174	170	172	2
MIXr_5	167	167	167	0
MIXr_7.5	170	169	170	1
Cr_5	169	169	169	0
Mr_5	174	171	173	2
Fr_5	170	172	171	1

Quadro A-0.2 – Retenção de água

Amassadura	Água (g)	mc (g)	mv (g)	ci (g)	ma (g)	mh (g)	mf(g)	R (%)	Média	Desvio Padrão
Ref	650	928,61	515,86	4558,00	51,51	23,22	13,54	81,22	81,04	0,27
		908,79	493,61	4558,00	51,82	23,36	13,61	81,17		
		922,32	506,84	4558,00	51,86	23,76	13,76	80,73		
MIXr_2.5	700	902,70	515,86	4658,00	50,54	20,44	11,79	82,89	82,36	0,46
		878,53	493,61	4658,00	50,29	20,94	11,96	82,14		
		899,81	506,84	4658,00	51,34	22,10	12,89	82,06		
MIXr_5	740	881,18	515,86	4758,00	49,17	22,30	12,62	80,31	80,84	0,56
		862,20	493,61	4758,00	49,61	21,21	11,99	81,43		
		883,50	506,84	4758,00	50,70	22,20	12,45	80,78		
MIXr_7.5	760	873,11	515,86	4858,00	48,33	21,89	11,74	78,99	80,09	1,04
		856,21	493,61	4858,00	49,05	20,84	11,14	80,24		
		862,89	506,84	4858,00	48,17	21,75	12,63	81,05		
Fr_5	820	897,27	515,86	4758,00	56,07	22,15	11,79	81,52	81,39	0,31
		874,54	493,61	4758,00	56,00	22,35	11,74	81,04		
		891,84	506,84	4758,00	56,60	22,42	12,03	81,63		
Mr_5	720	888,29	515,86	4758,00	48,95	21,26	11,97	81,02	80,69	0,32
		859,89	493,61	4758,00	48,14	21,20	11,90	80,68		
		877,08	506,84	4758,00	48,66	21,56	12,02	80,39		
Cr_5	750	870,90	515,86	4758,00	48,34	22,33	11,69	77,99	76,66	1,33
		849,93	493,61	4758,00	48,52	26,50	14,54	75,34		
		870,35	506,84	4758,00	49,50	23,51	11,95	76,65		

Quadro A-0.3 – Módulo de elasticidade dinâmico

Arg	ID	Ed1	Ed2	Arg	ID	Ed1	Ed2	Ed3	Arg	ID	Ed1	Ed2	Ed3
Ref	R2.1	4931	5971	MIXr_2.5	R10.1	3152		5768	MIXr_5	R1.1	2698	2953	
		4914	6148			3759		5920			2751	2892	
		4913	5676			3766		5978			2714	2931	
		4883	5657			3776		5917			2708	2916	
	R2.2	4994	6877		R10.2	3565				R1.2	2333		9025
		5029	6158			3567					2362		9027
		4936	5800			3588					2329		9017
		4959	5887			3549					2327		9008
	R2.3	4824	5554		R10.3	3553	4249			R1.3	2597	2930	9840
		4781	5392			3595	4400				2584	3060	9816
		4742	5750			3537	4141				2524		9799
		4790	6451			3570	4447				2549	2925	9807
	R3.1	4624	6081		Z4.1	3754		6286		R9.1	2053		7672
		4663	6124			3752		5615			2036		7647
		4677	6016			3745		6229			2070		7661
		4669	5711			3763	5255				2072	2626	7636
	R3.2	4621	6201		Z4.2	3718	4788			R9.2	1957		7401
		4434	6228			3669	4257				1843		7351
		4432	6193			3777	5255				1855		7364
		4435	6303			3786	5235				1977		7394
	R3.3	4843	5898		Z4.3	3441	4769			R9.3	2190		8379
		4860	5841			3446	4821				2192		8398
		4769	6693			3455	4733				2174		8418
		4817	6189			3440	4916				2085		8384

Quadro A-3 – Módulo de elasticidade dinâmico (continuação)

Arg	ID	Ed1	Ed2	Arg	ID	Ed1	Ed2	Arg	ID	Ed1	Ed2	Arg	ID	Ed1	Ed2
MIXr_7.5	R12.1	1940	7164	Cr_5	R13.1	2480	9400	Mr_5	R17.1	2188	8043	Fr_5	R19.1	1888	7139
		2006	7430			2465	9439			2170	7889			1903	7146
		2001	7216			2487	8970			2193	7906			1897	7104
		1974	7328			2469	9348			2189	7954			1879	7162
	R12.2	2031	7432		R13.2	2417	9149		R17.2	2173	7999		R19.2	1665	6603
		2049	7381			2451	9134			2201	7970			1689	6680
		2027	7399			2426	9165			2180	7987			1670	6597
		2016	7423			2449	9183			2197	8016			1669	6643
	R12.3	2031	8002		R13.3	2430	9036		R17.3	2435	9294		R19.3	1787	7024
		2083	7942			2424	9093			2449	8875			1763	7062
		2049	7973			2448	9110			2426	9101			1798	6980
		2074	7899			2411	9080			2460	9224			1774	7003
	R5.1	2018	8016		R14.1	2601	9978		R18.1	2506	9215		R20.1	1543	1706
		2021	8103			2616	10015			2480	9244			1480	1700
		2030	8042			2581	9957			2521	9291			1522	1714
		2016	8106			2623	9987			2497	9257			1516	1690
	R5.2	2101	7948		R14.2	2845	9961		R18.2	2454	9187		R20.2	1813	7100
		2086	7831			2813	10003			2484	9160			1827	7083
		2074	7963			2859	10204			2460	9003			1808	7056
		2060	7947			2784	10161			2441	9086			839	7087
	R5.3	2000	8049		R14.3	2566	10025		R18.3	2509	9176		R20.3	2113	7584
		1980	8106			2670	9962			2468	9190			2087	7577
		1984	8302			2574	10016			2520	9080			2121	7430
		1993	8173			2593	10082			2528	9006			2109	7592

Quadro A-0.4 – Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

Argamassa	Provete	Ft(N)	Rt (MPa)	Fc (N)	Rc (MPa)
Ref	R2.1	234,702	0,542	2336,78	1,440
	R2.2	232,574	0,536	2221,37	1,365
	R2.3	178,874	0,407	2395,45	1,465
	R3.1	204,256	0,467	2257,03	1,407
	R3.2	200,57	0,463	2279,49	1,423
	R3.3	219,718	0,503	2349,41	1,446
MIXr_2.5	R10.1	182,981	0,416	1289,411	0,790
	R10.2	160,989	0,373	961,61	0,596
	R10.3	167,565	0,382	1114,194	0,685
	Z4.1	148,303	0,340	937,854	0,573
	Z4.2	173,424	0,393	977,51	0,593
	Z4.3	178,589	0,406	1070,4	0,649
MIXr_5	R1.1	145,163	0,333	1719,027	1,043
	R1.2	113,944	0,261	1624,961	0,993
	R1.3	110,735	0,253	1583,405	0,972
	R9.1			1706,105	1,048
	R9.2			1821,516	1,114
	R9.3	99,87	0,222	1777,995	1,064
MIXr_7.5	R12.1	110,382	0,245	960,6	0,584
	R12.2	95,728	0,224	959,757	0,604
	R12.3	100,825	0,233	802,511	0,502
	R5.1	106,025	0,248	962,562	0,600
	R5.2	97,014	0,221	997,382	0,609
	R5.3	83,589	0,189	949,357	0,582

Quadro A-0.5 – Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

Argamassa	Provete	Ft(N)	Rt (MPa)	Fc (N)	Rc (MPa)
Cr_5	R13.1	113,872	0,265	1100,05	0,683
	R13.2	101,254	0,230	1005,5	0,624
	R13.3	122,607	0,277	951,55	0,590
	R14.1	108,774	0,238	1217,37	0,755
	R14.2	172,624	0,377	1308,07	0,799
	R14.3	103,14	0,234	1144,39	0,709
Mr_5	R17.1	78,209	0,180	922,65	0,569
	R17.2	84,332	0,193	968,115	0,595
	R17.3	113,76	0,263	1165,16	0,716
	R18.1	122,098	0,283	1069,75	0,662
	R18.2	100,023	0,230	1110,71	0,681
	R18.3	127,015	0,287	1108,74	0,684
Fr_5	R19.1	95,29	0,221	697,245	0,432
	R19.2	85,322	0,198	686,3	0,424
	R19.3	84,82	0,197	788,465	0,490
	R20.1	73,908	0,174	779,91	0,491
	R20.2	91,762	0,212	778,09	0,481
	R20.3	93,321	0,221	849,1	0,532

Quadro A-0.6 – Capilaridade até aos 180 minutos

Arg	ID	Massa (g)						
		0 min	5 min	15min	30 min	60 min	120 min	180 min
Ref	R2.1	119,866	125,317	127,303	127,824	127,932	128,08	128,193
	R2.2	115,061	119,227	120,873	121,572	121,65	121,753	121,874
	R2.3	119,249	124,029	125,739	126,23	126,164	126,44	126,536
	R3.1	115,966	121,486	123,359	123,978	124,015	124,211	124,312
	R3.2	117,88	122,183	123,911	124,425	124,621	124,653	124,671
	R3.3	119,021	123,47	124,858	125,167	125,164	125,314	125,378
MIXr_2.5	R10.1	108,919	113,018	114,567	116,114	116,204	116,334	116,384
	R10.2	104,645	109,844	111,746	113,94	114,065	114,417	114,487
	R10.3	106,39	110,844	112,369	114,035	114,114	114,332	114,473
	Z4.1	107,731	111,817	113,32	115,297	115,455	115,702	115,804
	Z4.2	109,75	113,96	115,447	117,158	117,336	117,445	117,585
	Z4.3	107,365	110,724	112,162	112,745	112,879	113,022	113,096
MIXr_5	R1.1	103,175	106,287	107,728	109,231	109,381	109,578	109,624
	R1.2	97,077	100,479	101,987	104,242	104,538	104,654	104,791
	R1.3	108,209	112,771	114,085	115,425	115,471	115,71	115,907
	R9.1	96,865	99,778	100,725	102,342	102,789	103,207	103,267
	R9.2	95,575	98,532	99,512	101,196	102,01	102,558	102,691
	R9.3	100,994	104,352	105,397	107,337	108,064	108,479	108,503
MIXr_7.5	R12.1	95,949	99,564	100,71	102,932	103,356	103,667	103,786
	R12.2	85,685	89,06	90,151	92,009	92,294	92,504	92,647
	R12.3	88,768	92,448	93,543	95,632	95,917	96,195	96,401
	R5.1	90,867	94,587	95,625	97,658	98,069	98,449	98,542
	R5.2	97,833	102,291	103,524	105,565	105,728	105,974	106,099
	R5.3	95,829	99,53	100,608	102,841	103,285	103,324	103,551
Cr_5	R13.1	100,52	103,411	109,933	111,134	111,445	111,665	111,73
	R13.2	80,545	86,744	89,209	89,399	89,477	89,594	89,655
	R13.3	93,356	99,394	102,869	103,627	103,855	104,002	104,247
	R14.1	93,655	99,551	102,725	103,495	103,654	103,803	104,033
	R14.2	75,421	81,708	83,272	83,31	83,509	83,623	83,794
	R14.3	103,798	109,777	113,222	114,279	114,473	114,591	114,81
Mr_5	R17.1	99,33	104,278	106,877	108,88	109,612	109,898	110,03
	R17.2	103,438	108,915	111,814	113,939	114,652	114,806	114,962
	R17.3	102,762	107,827	110,453	112,422	113,275	113,441	113,452
	R18.1	105,551	110,77	113,511	115,415	116,672	116,879	117,063
	R18.2	100,663	105,367	107,821	109,706	111,014	111,264	111,425
	R18.3	100,224	105,227	107,762	109,632	110,299	110,533	110,707

Quadro A.6 – Capilaridade até aos 180 minutos (continuação)

Arg	ID	Massa (g)						
		0 min	5 min	15min	30 min	60 min	120 min	180 min
Fr_5	R19.1	97,853	103,083	105,618	107,222	108,412	108,801	108,967
	R19.2	99,467	105,258	107,631	109,473	110,422	110,589	110,823
	R19.3	98,809	104,286	106,694	108,359	109,519	109,808	110,007
	R20.1	96,176	101,629	104,129	105,833	106,699	107,07	107,378
	R20.2	98,12	103,129	105,566	107,379	108,74	109,143	109,61
	R20.3	98,917	103,871	106,21	107,798	109,281	109,717	109,889

Quadro A-0.7 – Capilaridade desde os 240 minutos até 10080 minutos

Arg	ID	Massa (g)						
		240 min	300 min	360 min	1440 min	2880 min	4320 min	10080 min
Ref	R2.1	128,275	128,296	128,381	128,785	129,054	129,22	129,512
	R2.2	121,994	122,235	122,01	122,334	122,529	122,766	122,925
	R2.3	126,596	126,628	126,645	126,945	127,201	127,366	127,52
	R3.1	124,386	124,463	124,504	124,844	125,227	125,357	125,54
	R3.2	124,709	124,892	124,91	125,18	125,4	125,552	125,77
	R3.3	125,473	125,513	125,539	125,909	126,037	126,194	126,407
MIXr_2.5	R10.1	116,416	116,49	116,616	117,151	117,295	117,487	117,644
	R10.2	114,577	114,611	114,707	115,1	115,383	115,562	115,894
	R10.3	114,66	114,918	114,969	115,012	115,131	115,274	115,392
	Z4.1	115,872	116,056	116,082	116,505	116,777	116,925	117,125
	Z4.2	117,635	117,809	118,062	118,2	118,541	118,701	118,822
	Z4.3	113,134	113,257	113,333	113,738	113,786	113,926	114,15
MIXr_5	R1.1	109,796	110,29	110,468	110,512	110,971	111,351	111,666
	R1.2	104,921	105,292	105,303	105,413	105,479	105,627	105,732
	R1.3	115,966	116,147	116,371	116,436	116,561	116,711	116,74
	R9.1	103,393	103,532	103,952	104,017	104,232	104,362	104,373
	R9.2	103,137	103,219	103,292	103,317	103,569	103,65	103,832
	R9.3	108,559	108,724	108,766	109,444	109,703	109,795	109,935
MIXr_7.5	R12.1	103,811	103,993	104,11	104,549	104,776	104,799	104,994
	R12.2	92,929	93,254	93,301	93,347	95,41	93,481	93,685
	R12.3	96,727	96,814	96,62	97,02	97,124	97,261	97,38
	R5.1	98,635	98,813	98,866	99,164	99,375	99,601	99,826
	R5.2	106,128	106,237	106,411	106,766	107,039	107,128	107,228
	R5.3	103,628	103,914	103,477	103,796	103,881	103,981	104,152

Quadro A-7 – Capilaridade desde os 240 minutos até 10080 minutos (continuação)

Arg	ID	Massa (g)						
		240 min	300 min	360 min	1440 min	2880 min	4320 min	10080 min
Cr_5	R13.1				112,094	112,23	112,417	112,752
	R13.2				89,836	90,012	90,16	90,416
	R13.3				104,382	104,607	104,723	105,093
	R14.1				104,239	104,427	104,59	104,841
	R14.2				83,892	84,074	84,227	84,462
	R14.3				115,095	115,334	115,408	115,864
Mr_5	R17.1				110,215	110,364	110,582	110,865
	R17.2				115,179	115,366	115,514	115,739
	R17.3				113,753	113,9	114,045	114,322
	R18.1				117,299	117,519	117,689	118,002
	R18.2				111,636	111,849	111,965	112,23
	R18.3				110,799	110,898	111,16	111,441
Fr_5	R19.1				109,224	109,395	109,554	109,657
	R19.2				110,989	111,12	111,231	111,479
	R19.3				110,121	110,223	110,398	110,696
	R20.1				107,488	107,707	107,806	108,058
	R20.2				109,59	109,837	109,861	110,121
	R20.3				110,147	110,268	110,43	110,663

Quadro A-0.8 – Secagem das argamassas de referência e mistura de resíduo de borracha até aos 2880 minutos

Arg	ID	Massa (g)							
		0 min	60 min	120 min	180 min	240 min	300 min	1440 min	2880 min
Ref	R2.1	129,795	129,568	129,400	129,246	129,068	128,993	127,198	126,158
	R2.2	123,197	123,037	122,893	122,767	122,612	122,557	120,841	119,741
	R2.3	127,778	127,626	127,507	127,400	127,262	127,210	125,709	124,707
	R3.1	125,793	125,599	125,414	125,246	125,049	124,974	122,528	121,195
	R3.2	125,979	125,790	125,645	125,527	125,380	125,322	123,523	122,501
	R3.3	126,652	126,497	126,376	126,275	126,142	126,095	124,635	123,754
MIXr_2.5	R10.1	118,279	118,100	117,958	117,838	117,706	117,044	115,835	114,624
	R10.2	116,237	116,073	115,923	115,791	115,632	115,562	113,031	111,091
	R10.3	115,734	115,592	115,475	115,374	115,269	115,214	113,387	111,961
	Z4.1	117,606	117,406	117,245	117,111	116,951	116,879	114,777	113,249
	Z4.2	119,280	119,093	118,942	118,820	118,661	118,600	116,456	114,816
	Z4.3	114,608	114,402	114,255	114,131	113,962	113,899	111,642	110,110
MIXr_5	R1.1	111,906	111,700	111,515	111,357	111,171	111,130	109,787	109,070
	R1.2	106,158	105,989	105,846	105,720	105,572	105,505	103,466	102,002
	R1.3	116,831	116,653	116,493	116,361	116,197	116,117	114,119	112,927
	R9.1	104,877	104,696	104,542	104,417	104,250	104,179	102,105	100,662
	R9.2	104,219	104,032	103,830	103,758	103,600	103,525	101,484	99,980
	R9.3	110,260	110,004	109,817	109,668	109,477	109,393	107,121	105,470
MIXr_7.5	R12.1	105,435	105,262	105,134	105,015	104,869	104,612	102,874	101,297
	R12.2	94,128	93,987	93,863	93,755	93,619	93,567	91,623	90,020
	R12.3	97,900	97,764	97,630	97,515	97,369	97,331	95,409	93,933
	R5.1	99,996	99,823	99,682	99,577	99,443	99,384	97,571	96,284
	R5.2	107,779	107,618	107,486	107,373	107,222	107,165	105,157	103,730
	R5.3	104,399	104,183	104,002	103,858	103,664	103,597	101,484	99,862

Quadro A-0.9 – Secagem das argamassas de referência e mistura de resíduo de borracha até aos 40320 minutos

Arg	ID	Massa (g)							
		4320 min	8640 min	10080 min	11520 min	12960 min	14400 min	38880 min	40320 min
Ref	R2.1	125,461	123,859	123,445	123,077	122,677	122,446	120,751	120,750
	R2.2	119,147	117,832	117,531	117,294	117,039	116,884	115,869	115,871
	R2.3	124,032	122,696	122,364	122,076	121,765	121,586	120,179	120,179
	R3.1	120,413	118,797	118,472	118,223	117,943	117,766	116,578	116,582
	R3.2	121,952	120,653	120,350	120,090	119,796	119,617	118,604	118,611
	R3.3	123,235	122,173	121,906	121,657	121,366	121,191	120,858	120,858
MIXr_2.5	R10.1	113,647	111,817	111,511	111,265	110,962	110,802	110,111	110,120
	R10.2	109,624	107,552	107,219	106,948	106,629	106,442	105,776	105,788
	R10.3	110,774	108,872	108,566	108,324	108,016	107,835	107,288	107,298
	Z4.1	111,990	110,105	109,801	109,565	109,282	109,129	108,831	108,843
	Z4.2	113,558	112,093	111,841	111,643	111,392	111,240	110,779	110,789
	Z4.3	109,195	108,149	107,944	107,773	107,554	107,428	107,204	107,213
MIXr_5	R1.1	108,410	106,696	106,203	105,784	105,331	105,064	104,457	104,469
	R1.2	100,827	99,244	99,007	98,816	98,598	98,480	98,367	98,382
	R1.3	111,737	109,550	109,213	108,988	108,703	108,696	108,642	108,654
	R9.1	99,388	97,889	97,695	97,570	97,445	97,397	97,519	97,526
	R9.2	98,806	97,469	97,251	97,083	96,875	96,779	96,777	96,787
	R9.3	104,355	103,053	102,835	102,650	102,421	102,287	102,124	102,139
MIXr_7.5	R12.1	99,932	98,276	98,046	97,845	97,602	97,462	97,101	97,114
	R12.2	88,847	87,544	87,355	87,194	87,001	86,895	86,827	86,840
	R12.3	92,655	91,151	90,925	90,740	90,518	90,382	90,073	90,085
	R5.1	95,248	93,320	93,007	92,748	92,434	92,247	91,671	91,681
	R5.2	102,464	100,441	100,151	99,911	99,617	99,456	99,109	99,119
	R5.3	98,577	97,388	97,192	97,021	96,792	96,672	96,453	96,465

Quadro A-0.10 – Secagem das argamassas de cada fração granulométrica de resíduo de borracha até aos 2880 minutos

Arg	ID	Massa (g)						
		0 min	60 min	120	180	240	1440	2880
Cr_5	R13.1	113,019	112,735	112,627	112,547	112,432	110,461	108,628
	R13.2	90,565	90,322	90,215	90,154	90,029	88,230	86,365
	R13.3	105,367	105,148	105,040	104,988	104,799	102,987	101,007
	R14.1	105,069	104,809	104,684	104,722	104,613	102,630	100,670
	R14.2	84,715	84,482	84,373	84,264	84,125	82,360	80,591
	R14.3	115,980	115,679	115,547	115,443	115,348	112,892	110,650
Mr_5	R17.1	111,095	110,869	110,766	110,674	110,556	108,956	107,591
	R17.2	115,933	115,698	115,583	115,498	115,388	113,445	111,731
	R17.3	114,356	114,165	114,060	113,959	113,832	112,253	110,641
	R18.1	118,149	117,909	117,796	117,698	117,758	115,775	114,165
	R18.2	112,352	112,137	112,026	111,911	111,821	109,909	108,183
	R18.3	111,546	111,366	111,271	111,180	111,025	109,410	107,931
Fr_5	R19.1	109,897	109,664	109,545	109,429	109,365	107,438	105,980
	R19.2	111,640	111,423	111,303	111,198	111,089	109,157	107,600
	R19.3	110,896	110,713	110,613	110,519	110,433	108,838	107,275
	R20.1	108,234	108,048	107,948	107,867	107,741	106,109	104,557
	R20.2	110,330	110,138	110,035	109,933	109,840	108,083	106,447
	R20.3	110,753	110,553	110,440	110,329	110,265	108,357	106,806

Quadro A-0.11 - Secagem das argamassas de cada fração granulométrica de resíduo de borracha até aos 36000 minutos

Arg	ID	Massa (g)						
		4320	5760	30240	31680	33120	34560	36000
Cr_5	R13.1	106,724	105,510	101,405	101,360	101,301	101,265	101,221
	R13.2	84,478	83,607	81,093	81,098	81,103	81,100	81,099
	R13.3	98,782	97,666	94,476	94,443	94,410	94,374	94,380
	R14.1	98,253	97,248	94,614	94,595	94,572	94,561	94,550
	R14.2	79,008	78,294	76,063	76,062	76,063	76,061	76,060
	R14.3	108,672	107,811	104,719	104,689	104,665	104,642	104,645
Mr_5	R17.1	106,177	105,263	100,629	100,570	100,505	100,459	100,455
	R17.2	110,050	108,953	104,713	104,650	104,580	104,531	104,514
	R17.3	109,012	107,987	104,076	104,005	103,929	103,880	103,810
	R18.1	112,399	111,279	106,879	106,819	106,750	106,725	106,715
	R18.2	106,541	105,488	101,825	101,778	101,734	101,708	101,698
	R18.3	106,437	105,552	101,535	101,470	101,401	101,353	101,329
Fr_5	R19.1	104,329	103,176	99,127	99,077	99,017	98,985	98,973
	R19.2	105,864	104,675	100,693	100,641	100,589	100,551	100,543
	R19.3	105,543	104,325	100,507	100,432	100,350	100,294	100,242
	R20.1	103,054	102,061	97,458	97,397	97,333	97,289	97,254
	R20.2	104,768	103,671	99,521	99,458	99,387	99,333	99,317
	R20.3	105,194	104,141	100,233	100,171	100,100	100,050	100,043

Quadro A-0.12 – Pesagens parciais e finais no ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente

Arg	ID	Peso inicial (g)	Peso submerso (g)	Peso saturado (g)	Pab (%)	Pab (%)	MVap (kg/m ³)
Ref	R2.1	46,829	27,759	52,051	21,497	21,5	1928
	R2.2	71,208	42,422	79,335	22,017	22,0	1929
	R2.3	70,952	42,195	79,044	21,960	22,0	1925
	R3.1	61,658	36,646	68,783	22,171	22,2	1919
	R3.2	65,983	38,984	73,377	21,499	21,5	1919
	R3.3	62,466	37,102	69,609	21,974	22,0	1922
MIXr_2.5	R10.1	54,819	30,852	61,444	21,656	21,7	1792
	R10.2	58,086	32,785	65,278	22,134	22,1	1788
	R10.3	63,773	35,684	71,711	22,033	22,0	1770
	Z4.1	68,787	38,538	77,246	21,853	21,9	1777
	Z4.2	69,486	39,099	77,861	21,606	21,6	1793
	Z4.3	57,310	32,299	63,987	21,071	21,1	1809
MIXr_5	R1.1	59,553	32,558	67,643	23,058	23,1	1697
	R1.2	55,149	30,19	62,389	22,485	22,5	1713
	R1.3	56,774	31,119	64,301	22,684	22,7	1711
	R9.1	62,070	32,593	70,66	22,565	22,6	1631
	R9.2	53,125	27,829	60,798	23,273	23,3	1611
	R9.3	60,174	31,696	69,744	25,152	25,2	1582
MIXr_7.5	R12.1	53,209	28,559	60,56	22,971	23,0	1663
	R12.2	49,058	26,336	55,991	23,379	23,4	1654
	R12.3	52,987	28,501	60,47	23,407	23,4	1657
	R5.1	51,070	27,366	58,476	23,806	23,8	1642
	R5.2	57,078	30,443	64,977	22,873	22,9	1653
	R5.3	55,670	29,626	63,332	22,732	22,7	1652
Cr_5	R13.1	59,858	33,059	68,202	23,743	23,7	1703
	R13.2	51,801	28,612	58,391	22,130	22,1	1740
	R13.3	57,720	31,964	65,95	24,216	24,2	1698
	R14.1	53,539	30,215	60,723	23,548	23,5	1755
	R14.2	60,858	34,522	68,786	23,138	23,1	1776
	R14.3	67,069	37,782	76,055	23,479	23,5	1752
Mr_5	R17.1	56,364	31,019	64,144	23,487	23,5	1702
	R17.2	55,742	30,553	63,126	22,669	22,7	1711
	R17.3	56,307	31,069	63,747	22,768	22,8	1723
	R18.1	37,648	20,789	42,77	23,302	23,3	1713
	R18.2	59,842	32,774	67,769	22,652	22,7	1710
	R18.3	51,444	28,28	58,62	23,654	23,7	1696
Fr_5	R19.1	56,416	30,568	65,076	25,096	25,1	1635
	R19.2	44,118	23,886	50,543	24,102	24,1	1655
	R19.3	61,413	33,405	70,575	24,649	24,6	1652
	R20.1	56,811	30,734	65,342	24,650	24,7	1642
	R20.2	61,342	33,273	70,607	24,817	24,8	1643
	R20.3	47,121	25,424	54,082	24,290	24,3	1644

QuadroA-0.13 – Condutibilidade térmica

Argamassa	λ (W/m.K)			Média	Desvio Padrão	cp (J/m ³ .K)	a (m ² /s)
Ref	1,112	1,06	1,143	1,105	0,042	1,57E+06	6,94E-07
MIXr_2.5	0,834	0,827	0,831	0,831	0,004	1,55E+06	5,58E-07
MIXr_5	0,682	0,668	0,68	0,677	0,008	1,50E+06	4,41E-07
MIXr_7.5	0,678	0,663	0,667	0,669	0,008	1,43E+06	4,70E-07
Cr_5	0,861	0,85	0,858	0,856	0,006	1,60E+06	5,35E-07
Mr_5	0,701	0,71	0,715	0,709	0,007	1,48E+06	4,78E-07
Fr_5	0,644	0,655	0,659	0,653	0,008	1,57E+06	4,15E-07