

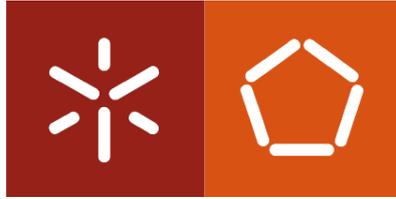
Universidade do Minho

Departamento de Engenharia Civil

Jia Zhiyou

BETÃO LEVE COM RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO

Agosto 2021



Universidade do Minho

Departamento de Engenharia Civil

Jia Zhiyou

BETÃO LEVE COM RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO

Dissertação de Mestrado

Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor José Luís Barroso de Aguiar

Coorientador

Professor Fernando Castro

Agosto 2021

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do Repositório da Universidade do Minho.

Agradecimentos

Encontro é destino, estou muito feliz por ter feito meu curso de mestrado na Universidade do Minho, aprendi muito. Permitiu-me compreender os costumes de Portugal, vivenciar a educação na Europa, sentir a ajuda séria e entusiasta dos professores, e ao mesmo tempo experimentar a paixão pelo samba de muitos dos meus colegas brasileiros.

Agradeço especialmente ao professor Barroso Aguiar pela ajuda, paciência e disponibilidade em me orientar. Sua colaboração foi fundamental para que eu conseguisse explicar os pontos principais do trabalho. Me acompanhou durante toda a fase de pesquisa, sempre demonstrando interesse e preocupação com a minha vida.

Ao meu coorientador, Professor Fernando Castro, que em decorrência da pesquisa de doutoramento que desenvolve pôde além de me ajudar com explicações sobre Resíduos de Fundição também forneceu os materiais necessários para meu experimento, sempre sob a orientação de meu orientador.

Professor Luís Bragança, é simpático e gentil, deu grande contributo ao meu aprendizado. Gostava muito da sua aula, era sempre animada.

Senhor Carlos Jesus, é o amigo que encontrei em Portugal com os hobbies mais semelhantes aos meus. Me ajudou imensamente em todos preparos para os ensaios. Ensinou-me pessoalmente os cuidados e operação de cada experimento. É uma pessoa muito otimista ao mesmo tempo que trabalhadora.

Claro, ainda há muitos professores que me ensinaram. Preciso agradecer a todos os professores pela orientação e comunicação paciente. Enquanto aprendia o conhecimento acadêmico profissional, também me sentia acolhido por todos.

Há um ditado na China que diz que os amigos ao seu redor também são os melhores professores. Sim, tive a sorte de conhecer colegas de classe muito gentis. Rafael é o colega que mais me ajudou. Estamos no mesmo grupo. Lembro-me de que, quando fiz o dever de casa em grupo pela primeira vez, ele foi muito paciente para me ajudar, frase a frase ensinou-me a elaborar meu discurso. A convivência com os meus colegas de classe contribuiu significativamente para a melhora do meu domínio da língua portuguesa, hoje consigo distinguir facilmente o português de Portugal do português brasileiro.

O tempo voa, estou a estudar em Portugal há dois anos e não me encontro com a minha família durante todo esse tempo. Neste momento, também gostaria de agradecer aos meus pais pelo apoio na realização dos meus sonhos. Toda vez que tenho uma videochamada com minha mãe, posso ver o quanto ela sente minha falta, mas não me diz, talvez porque não quer que eu me preocupe, e assim possa ter um ambiente melhor para perseguir meus sonhos.

Também sou muito grato à minha pátria mãe, a China. Nos últimos anos, com o desenvolvimento gradual da China, um enorme mercado foi criado para minha área de pesquisa. A reutilização de materiais residuais, a promoção de conceitos de proteção ambiental para as pessoas e o apoio e orientação de uma série de políticas governamentais, acredito que pesquisas e aplicações futuras se tornarão pontos críticos. Ao mesmo tempo, também defendo que os resultados desta pesquisa científica sejam aplicados para servir as pessoas e reduzir os impactos ambientais.

Por fim, gostaria de agradecer a mim mesmo. Trabalhei na África por um ano e meio depois de me formar na graduação. Vivenciei a vida em um ambiente de trabalho difícil, experimentei os momentos de vida e morte de ladrões usando armas para chantagear, também sofri com calor escaldante do ambiente de trabalho. Antes de experimentar essas coisas, achava que aprender era uma coisa relativamente tediosa, mas agora penso que aprender é a coisa mais empolgante do mundo. No dia agitado na África, eu passava duas horas lendo e estudando à noite, essa experiência teve um impacto profundo em mim, ajudou-me a encarar as muitas horas de estudo dedicadas a esta pesquisa com paciência e perseverança.

Às vezes, as pessoas comentam que sou ambicioso demais. Na verdade, é que depois de passar pela pior situação, o pior resultado que você pode suportar é proporcionalmente simétrico ao objetivo mais elevado que você busca! Contanto que você trabalhe duro, sempre encontrará sua própria sorte!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Betão leve com resíduos de fundição

RESUMO

Com o desenvolvimento da indústria de engenharia, a demanda por betão está aumentando a cada ano, e os requisitos de desempenho do betão em diferentes projetos também são diferentes. Mas, em geral, sob a premissa do desenvolvimento sustentável ambiental e ecológico, a direção da pesquisa do betão é verde, leve e de alta resistência. Gabriel Bejan et al. concluíram que, nos últimos anos, alguns pesquisadores têm utilizado resíduos sólidos industriais para betão leve para substituir cimento ou agregados naturais parcial ou totalmente [1].

Na indústria de fundição, uma grande quantidade de resíduos de moldes cerâmicos é transportada para o aterro todos os anos, o que não só polui o meio ambiente, mas também causa danos ecológicos. Esse problema é enfrentado na indústria mundial de fundição, principalmente na Índia, China e nos Estados Unidos [2]. Neste estudo, após caracterizar os resíduos de moldes cerâmicos de fundição (RF), buscou-se substituir o agregado graúdo leve em betão leve com 30%, 60% e 80% de RF. Finalmente, obtemos o resultado que com o aumento do conteúdo de RF, o desempenho de trabalhabilidade do betão leve é reduzido, o desempenho mecânico e a durabilidade são aumentados. E alcançou-se 80% de betão leve de alto volume de RF com uma densidade de 1998 kg/m^3 , a relação de A/C é 0.3, uma resistência média de 36 MPa e durabilidade melhor do que outras amostras.

Esta investigação utiliza apenas um tipo de resíduo sólido produzido pela indústria em betão leve. Da mesma forma, podemos usar o mesmo método e ideia para adicionar outros tipos de resíduos sólidos ao betão leve para perceber que os resíduos de uma indústria se tornam matéria-prima para outra indústria.

PALAVRAS-CHAVE:

Betão leve, resíduo de molde cerâmica de fundição, mecânica e durabilidade do betão leve

Lightweight concrete with waste of foundry

ABSTRACT

With the development of the engineering industry, the demand for concrete is increasing year by year, and the performance requirements for concrete in different projects are also different. But in general, under the premise of both environmental and ecological sustainable development, the research direction of concrete is green, lightweight, and high strength. Gabriel Bejan et al. concluded that in recent years, some researchers have used industrial solid waste for lightweight concrete to replace cement or natural aggregates [1].

In the cast iron industry, a large amount of ceramic mold waste is transported to the landfill every year, which not only pollutes the environment but also causes ecological damage. This problem is faced in the global cast iron industry, especially India, China and the United States [2]. In this study, after characterizing the cast iron ceramic mold waste, we tried to replace the lightweight coarse aggregate in lightweight concrete with 30%, 60%, and 80% RF. Finally, we get the result that with the increase of RF content, the working performance of lightweight concrete is reduced, the mechanical performance and durability are increases. And it has achieved 80% RF high-volume lightweight concrete with a density of 1998 kg/m³, w/c is 0.3, an average strength of 36MPa, and durability better than other samples.

This research only uses one kind of solid waste produced by industry in lightweight concrete. Similarly, we can use the same method and idea to add other types of solid waste to lightweight concrete to realize that waste from one industry becomes raw material for another industry.

KEY WORDS:

Lightweight concrete, waste of foundry sand, mechanical and durability of lightweight concrete

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Antecedentes e importância.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Descrição da Dissertação	3
2. Revisão bibliográfica	5
2.1. Definição do betão leve	5
2.2. Constituintes do betão leve.....	6
2.2.1. Água	6
2.2.2. Agregados leves.....	7
2.2.3. Agregados finos.....	8
2.2.4. Ligantes	9
2.2.5. Adjuvante	10
2.2.6. Resíduos de fundição.....	12
2.3. Caracterização dos constituintes do betão leve	13
2.3.1. Densidade	13
2.3.2. Teor de humidade	15
2.3.3. Granulometria.....	16
2.4. Características estruturais do betão leve.....	17
2.5. Aplicação do betão leve na construção.....	18
3. Materiais utilizados e procedimentos de ensaio.....	21
3.1. Materiais	21
3.1.1. Água	21
3.1.2. Cimento	21
3.1.3. Areia do rio.....	21
3.1.4. Argila Expandida.....	22
3.1.5. Resíduos de fundição.....	24
3.1.6. Superplastificante (SP)	26
3.2. Procedimentos de ensaio	27
3.2.1. Abaixamento.....	27
3.2.2. Absorção por imersão.....	28

3.2.3. Absorção por capilaridade	30
3.2.4. Resistência à compressão.....	32
3.2.5. Resistência à flexão.....	33
3.2.6. Módulo de elasticidade	34
3.2.7. Resistividade	37
3.2.8. Ultrassons.....	39
3.2.9. Migração de cloretos em regime não estacionário – CTH.....	41
3.2.10. Carbonatação.....	44
4. Análise de resultados	47
4.1. Metodologia Faury.....	47
4.1.1. Determinar a máxima dimensão do agregado.....	47
4.1.2. Dosagem de cimento.....	48
4.1.3. Determinar a relação A/C	49
4.1.4. Efeito de Parede	50
4.1.5. Fixar o valor A e B.....	51
4.1.6. Determinar $Y_{D/2}$	52
4.1.7. Fórmula básica da composição do betão.....	52
4.1.8. Determinar a percentagem de cimento.....	53
4.1.9. Curva de Faury.....	53
4.2. Quantidade da substituição de RF.....	54
4.3. Resultados de ensaios.....	55
4.3.1. Densidade.....	55
4.3.2. Abaixamento e quantidade de superplastificante.....	55
4.3.3. Absorção por imersão	57
4.3.4. Absorção por capilaridade	58
4.3.5. Resistência à compressão.....	59
4.3.6. Resistência à flexão.....	61
4.3.7. Módulo de Elasticidade.....	62
4.3.8. Resistividade	64
4.3.9. Ultrassons.....	65
4.3.10. Migração de cloretos por migração em regime não estacionário - CTH	65
4.3.11. Carbonatação.....	66

5. Conclusão e trabalhos futuros a desenvolver.....	71
5.1. Conclusão	71
5.2. Trabalhos futuros a desenvolver.....	72
6. Referências bibliográficas.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - O processo de produção de argila expandida [22]	8
Figura 2.2 - Estrutura de flocculação de cimento	11
Figura 2.3 - Princípio de funcionamento do superplastificante	11
Figura 2.4 - Vazamento de metal fundido.....	12
Figura 2.5 - Produção de RF da China de ano 2013 a 2019	13
Figura 2.6 - Ponte Stolma [42].....	18
Figura 2.7 – (a)Pavilhão de Portugal [50] e (b) Ponte de Fão [51].....	20
Figura 3.1 - Argila Expandida (AE).....	22
Figura 3.2 - Densidades e Absorção da água de Leca 2-10 e Leca 10-20	22
Figura 3.3 - Curva de gradação de partículas de Leca 2-10 e Leca 10-20.....	23
Figura 3.4 - Resíduos de moldes de cerâmica de fundição (RF)	24
Figura 3.5 - Características do RF, nomeadamente as densidades e a absorção de água	25
Figura 3.6 - Curva de gradação de partículas de RF.....	26
Figura 3.7 - Os equipamentos usados no ensaio de abaixamento	27
Figura 3.8 - Medição do valor de abaixamento	28
Figura 3.9 - Pesagem do provete saturado imerso em água.....	29
Figura 3.10 - Os provetes na caixa plástica	31
Figura 3.11 - Pesagem do provete relativamente no ensaio de capilaridade	32
Figura 3.12 - Ensaio de resistência à compressão.....	32
Figura 3.13 - Ensaio à flexão de um provete de betão.....	33

Figura 3.14 - Ciclos de carga e descarga fornecidos pelo equipamento de ensaio.....	35
Figura 3.15 - Esmerilar os provetes cilíndricos.....	36
Figura 3.16 - Um provete no ensaio de módulo de elasticidade.....	36
Figura 3.17 - Princípio da medição da resistividade	38
Figura 3.18 - Exemplo de uma medição da resistividade num determinado provete de betão leve	39
Figura 3.19 - Princípio da medição do detetor ultrassônico	40
Figura 3.20 - Ensaio de ultrassons a um provete de betão leve.....	41
Figura 3.21 - Os provetes cilíndricos com dimensão Ø100xH50mm	41
Figura 3.22 - a) Ensaio migração de cloretos com a indicação dos polos elétricos (+ e -) a conectar e a parte anódica e catódica das soluções; b) Ensaio realizado às misturas de betão leve	42
Figura 3.23 - a) Penetração nos provetes do ensaio de migração de cloretos em todas misturas do betão leve; b) Esquema de medição	44
Figura 3.24 - Medição da profundidade de carbonatação nos provetes	46
Figura 4.1 - Apresentação da curva de Faury para o estudo do betão leve de referência	53
Figura 4.2 - Os abaixamentos de betões leves frescos	56
Figura 4.3 - Percentagem de SP usado por cimento.....	56
Figura 4.4 - A média de absorção por imersão.....	57
Figura 4.5 - Curva de absorção de água por capilaridade	58
Figura 4.6.– Linha de absorção por capilaridade.....	59
Figura 4.7.– Os resultados de resistência à compressão (MPa)	60
Figura 4.8.– Tensão média de resistência à flexão (MPa) do estudo de betão leve com RF ...	61

Figura 4.9.– Resultados graficamente obtidos dos ciclos carga e descarga efetuados para a obtenção dos módulos de elasticidade (E)	62
Figura 4.10.– Resultados graficamente obtidos da mistura de REF de três provetes para os módulos elasticidade (E).....	63
Figura 4.11.– Valores dos módulos de elasticidades para as misturas estudadas.....	63
Figura 4.12.– O coeficiente de difusão no estado não estacionário dos provetes.....	66
Figura 4.13.– Evolução profunda da carbonatação.....	66
Figura 4.14.– A profundidade média de carbonatação no dia 56 (mm).....	67
Figura 4.15.– A profundidade média de carbonatação no dia 63 (mm).....	67
Figura 4.16.– A profundidade média de carbonatação no dia 70 (mm).....	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classes de resistência à compressão para betão leve	5
Tabela 2.2 - O processo de formação de cimento Portland	9
Tabela 2.3 - Alguns adjuvantes comuns	10
Tabela 3.1 - Características de CEM I 42,5R [53]	21
Tabela 3.2 - Características da areia do rio [54].....	21
Tabela 3.3 - O resultado de análise granulométrica da Leca 2-10 e Leca 10-20.....	23
Tabela 3.4 - Composição de Argila Expandida.....	24
Tabela 3.5 - O resultado de análise granulométrica do RF	25
Tabela 3.6 - Composição de RF	26
Tabela 3.7 - Parâmetros do MasterGlenium SKY 617 [55]	26
Tabela 3.8 - Classes de abaixamento.....	27
Tabela 4.1 – Valores do $D_{máx}$ dos agregados utilizados nas misturas de betão leve.....	48
Tabela 4.2 – Dosagem de ligante, razões água/ligante e classes de resistência do betão, em função das classes de exposição ambiental [67].....	48
Tabela 4.3 - Dosagem de ligante, razões água/ligante e classes de resistência do betão, em função das classes de exposição ambiental [67].....	49
Tabela 4.4 – Os valores dos parâmetros A e B da curva de Faury	51
Tabela 4.5 – O volume de vazios do betão compactado	52
Tabela 4.6 - As composições de betões leves (kg/m^3)	54
Tabela 4.7 – A quantidade do provete por cada tipo de betão leve.....	55
Tabela 4.8 – As densidades de betão leve (kg/m^3)	55

Tabela 4.9 – O coeficiente de variação da absorção por imersão	57
Tabela 4.10 – Características de resistência à compressão e densidade dos betões leves do estudo	60
Tabela 4.11 – Características de resistência à flexão.....	61
Tabela 4.12 – Resistência de compressão dos provetes cilíndricos (Fc)	62
Tabela 4.13 – Os valores de resistividade (kΩcm)	64
Tabela 4.14 – O nível de estimação da probabilidade de corrosão.....	64
Tabela 4.15 – O nível de indicação da taxa de corrosão.....	64
Tabela 4.16 – Os resultados do ensaio ultrassônico.....	65

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

RF – Resíduos de moldes cerâmicos de fundição;

σ_a – densidade aparente partículas (kg/m³);

σ_{rd} – densidade de partícula em uma base seca em estufa (kg/m³);

σ_{ssd} – densidade de partícula em uma base saturada e seca à superfície (kg/m³);

AE – Argila expandida;

SP – Superplastificante;

OPC - Cimento Portland (42.5);

CO₂ - Dióxido de carbono;

Al₂O₃ - Óxido de alumínio;

SiO₂ - Dióxido de silício;

Fe₂O₃ – Óxido férrico;

Na₂O - Óxido de sódio;

TiO₂ – Dióxido de titânio;

K₂O – Óxido de potássio;

NaOH - Hidróxido de sódio;

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio;

CaO – Óxido de cálcio;

CaCO₃ – Carbonato de cálcio;

H₂CO₃ – Ácido carbônico;

ZrO₂ – Dióxido de zircônio;

P₂O₅ – Pentóxido de difósforo;

MnO – Óxido de manganês;

Cr – Crômio;

Ni – Níquel;

S – Enxofre.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Antecedentes e importância

Com o desenvolvimento da indústria da construção e a demanda por estilos arquitetônicos diversificados nasceu o betão leve. Betão leve refere-se a betão com uma densidade de 800 a 2000 kg/m³, que é feito de agregado leve, areia, cimento e água [3]. Existem três tipos principais de agregados leves: agregados leves naturais (como escória vulcânica, pedrapomes, etc.), resíduos industriais (resíduos de fundição, etc.) e agregados leves artificiais (como argila expandida, xisto expandido, perlite expandida, etc.). Devido às características superiores do betão leve, atualmente é usado em muitos tipos diferentes de obras, como: edifícios altos, pontes, estruturas mistas de aço-betão, plataformas petrolíferas, pré-fabricação de painéis, pré-fabricação de vigas e lajes, obras de reabilitação estrutural, etc. (edifício do South-Western Bell Telephone Building, Kansas City, EUA, 1928; o Park Plaza Hotel em St. Louis, EUA, 1929; Tabuleiro da Ponte de Oakland, S. Francisco, EUA, 1936, etc.). Pode-se observar que a aplicação de betão leve na indústria da construção é muito extensa e também possui grande demanda no mercado.

De facto, já em 27 AC, a cúpula do Panteão de Roma (43,3m de diâmetro) usava betão leve pozolânico. Embora sua resistência à compressão seja de apenas 10MPa, seu conceito de melhoria do betão também é aceite por nossa corrente principal agora. O agregado leve substitui o agregado tradicional (brita ou godo) no betão tradicional para atingir o objetivo de menor massa do que o betão tradicional no mesmo volume [4]. Na pesquisa atual sobre betão leve, muitos autores escolhem agregados leves diferentes, como EQ Santiago, PR Lima e outros que usam resíduos de construção e de demolição para produzir betão leve de alta qualidade [5] e Almir Sales e outros que usam serragem (fibra de madeira) para produzir betão leve [6]. No entanto, mais autores estão estudando o desempenho da argila expandida como um agregado leve em betão leve e obtiveram melhores resultados [7].

Fatores como industrialização, urbanização e rápido crescimento populacional levaram à deterioração do atual ambiente global, e o consumo de energia em indústria da construção e as emissões de CO₂ representam 30% do total mundial [8]. Qualquer produção industrial sempre emite resíduos, se os resíduos produzidos por outras indústrias puderem ser reutilizados para a produção da indústria da construção, isso reduzirá bastante o consumo de energia primária e as emissões de CO₂ da indústria da construção [9][10]. Por exemplo,

atualmente o betão é o material de construção mais utilizado no mundo. Segundo as estatísticas, a produção de 1 tonelada de betão emitirá 0,05-0,13 toneladas de CO₂ no ambiente [11][12]. As emissões de gases de efeito estufa causadas pelo uso de agregados naturais representam 1% do total das emissões de gases de efeito estufa na produção de betão [13]. Pode-se observar que o uso racional de resíduos industriais na construção trará grandes benefícios económicos, ambientais e sociais.

Neste estudo, usamos principalmente resíduos de moldes cerâmicos de fundição (RF) para substituir agregados leves em betão leve.

Os RF são comumente usados em processos de fundição por fundições de metal para formar moldes nos quais o metal fundido é derramado. Após o resfriamento, os moldes de areia são quebrados e os produtos acabados são removidos [14]. De acordo com relatos da comunicação social chinesa, a China é o país com o maior número de empresas de fundição, com mais de 30.000 fundições. Em 2013, a produção total de várias peças fundidas foi de 44,5 milhões de toneladas (cerca de 40% da produção mundial), no entanto, a produção anual de RF atingiu 50 milhões de toneladas [15]. A indústria de fundição nos Estados Unidos é a segunda maior do mundo, consumindo 100 milhões de toneladas de areia para fundição a cada ano, enquanto gera 12 a 20 milhões de toneladas de RF [16][17]. A indústria de fundição indiana ocupa a terceira posição no mundo [14], com uma produção anual de cerca de 9,3 milhões de toneladas de peças fundidas (ano 2013) e uma produção anual de cerca de 1,71 milhão de toneladas de RF. Com uma quantidade tão grande de RF, a maioria dos métodos de processamento consiste no transporte para aterros sanitários. Com o aumento do custo do aterro e o impacto ambiental irreversível causado por aterros sanitários está se tornando cada vez mais sério. Portanto, existem pesquisas sobre a reciclagem e reutilização de RF. Significativamente, isso pode não apenas economizar o custo do descarte de resíduos para as empresas, mas também transformar os resíduos da indústria de fundição em um produto complementar das matérias-primas da indústria da construção para maximizar os benefícios sociais, económicos e ambientais.

1.2. Objetivos

O betão leve com argila expandida (AE) como agregado leve foi usado como padrão para comparação e substituição experimental, e as amostras de betão foram feitas substituindo a AE por diferentes quantidades (0, 30, 60 e 80%) de RF. O principal objetivo deste trabalho

consiste na formulação de betão leve com RF, com propriedades físicas e mecânicas semelhantes aos betões leves convencionais no 28º dia.

Para atingir esse objetivo, será necessário realizar um conjunto de tarefas, tais como:

- Otimizar as composições de betões leves com RF;
- Estudar as propriedades físicas e mecânicas dos betões leves com RF como densidade, fluidez e resistência;
- Avaliar a durabilidade dos betões leves com RF.

Finalmente, por meio de ensaios, são obtidas as composições dos betões leves de diferentes materiais ou misturas e as propriedades físicas e mecânicas de cada betão são testadas para analisar e comparar o desempenho do betão leve obtido sob a condição de diferentes quantidades de RF.

1.3. Descrição da Dissertação

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, nos quais serão abordados os conteúdos que se seguem:

- Capítulo 1 – Introdução. Neste capítulo é feito um breve status de pesquisa do tema e os objetivos desta dissertação;
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica. Estudo do desenvolvimento e aplicação de betão leve;
- Capítulo 3 – Materiais utilizados e procedimentos de ensaio. Aqui são apresentados os materiais usados e a sua caracterização;
- Capítulo 4 – Análise dos resultados. Neste capítulo, são analisados os ensaios das propriedades mecânicas e durabilidade dos provetes de betão leve após 28 dias de cura;
- Capítulo 5 – Conclusão e trabalhos futuros a desenvolver. Resume todo o processo de pesquisa e propõe a direção de investigações futuras.
- Capítulo 6 – Referência bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição do betão leve

O betão leve é uma mistura composta por materiais cimentícios, agregados leves granulares, aditivos químicos e aditivos minerais adicionados quando necessário, formado após a hidratação e endurecimento dos materiais compósitos com estrutura agregada. Atualmente, o betão mais utilizado é o betão feito de cimento. O grau de densidade é o indicador mais importante para julgar o betão leve. Devido aos diferentes tipos de agregados usados na preparação de betão leve, as normas nacionais geralmente dividem o betão leve em betão leve para isolamento térmico (nível de densidade $\leq 800 \text{ kg/m}^3$), betão leve para isolamento térmico estrutural (nível de densidade $800 \text{ kg/m}^3 - 1400 \text{ kg/m}^3$) e betão leve para estrutura (grau de densidade $1400 \text{ kg/m}^3 - 2000 \text{ kg/m}^3$). O betão leve é produzido utilizando parcial ou totalmente agregado leve. De acordo com a norma de EN 1097-3, agregado leve é um tipo de agregado que tem uma densidade aparente inferior a 1200 kg/m^3 . Em Portugal, de acordo NP EN 206-1 2007 [3], a densidade de betão leve, após secagem em estufa, é $800 \text{ kg/m}^3 - 2000 \text{ kg/m}^3$. O grau de resistência à compressão é dividido na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classes de resistência à compressão para betão leve

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ (N/mm ²)	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ (N/mm ²)
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

Na China, de acordo com o regulamento de «Especificação de projeto para estrutura de betão agregado leve» (JGJ12-2006), a faixa de grau de densidade (densidade aparente seca) de betão leve de alta resistência para estruturas é $1360 \text{ kg/m}^3 - 1950 \text{ kg/m}^3$, e a resistência de compressão mínima após 28 dias de cura é 15MPa.

No Estados Unidos, o Regulamentos de Estrutura de Betão Americanos (ACI318) estipula que a densidade aparente seca de betão leve de alta resistência para estrutura é $1440 \text{ kg/m}^3 - 1850 \text{ kg/m}^3$ e o valor mínimo de resistência à compressão após 28 dias de cura é de 17,2 MPa (medido em uma amostra cilíndrica com um diâmetro de 15,24 cm e uma altura de 30,48 cm).

Neste estudo, formamos um betão referência por argila expandida como agregado leve. Argila expandida é feita pela mistura de argila e quantidade adequada de lodo e, em seguida, queima em alta temperatura em forno rotativo, por fim, é peneirada em diferentes tamanhos de partículas e embalada para venda comercial.

A principal pesquisa deste estudo é a aplicação de resíduos de fundição em betão leve. Os resíduos de fundição são precisamente considerados os RF. É usado como um molde para fundição de peças. Depois que as fundições de peças são derramadas e resfriadas, os moldes precisam ser quebrados para retirá-las, e as modelagens triturados tornam-se resíduos de fundição.

Tentamos substituir a Argila expandida por resíduos de fundição de diferentes proporções de massa para configurar um novo tipo de betão leve com excelente desempenho.

2.2. Constituintes do betão leve

O betão leve é composto principalmente de água, agregados leves, cimento e adições etc. Os materiais com propriedades diferentes terão efeitos diferentes no desempenho do betão leve.

2.2.1. Água

As funções da água no betão é participar do processo de hidratação do cimento e unir agregados de diferentes tamanhos. Ao mesmo tempo, a água também desempenha uma função no controle da trabalhabilidade do betão fresco. Porém, diferentes tipos de água também têm um impacto importante na durabilidade do betão leve na fase posterior, por exemplo, a água do mar, por conter iões cloreto, causará a corrosão das barras de aço do betão leve e afetará a

durabilidade do betão leve. Portanto, a origem de água é um fator importante para julgar se ou como ele pode ser usada em betão leve.

De acordo de NP EN 1008 de 2003, a origem de água é dividida principalmente em água potável, água residual doméstica, água recuperada dos processos da indústria do betão, água do mar, água residual industrial, água subterrânea e superficial natural etc. Entre eles, a água potável pode ser usada diretamente no betão, e a água residual doméstica não pode ser usada no betão. A água do mar tratada pode ser usada no betão comum. Os restantes tipos das águas precisam ser testados em laboratório antes de determinar se pode ser usado. No entanto, o problema da escassez de água é também o problema da escassez de recursos que o mundo enfrenta atualmente. Os pesquisadores têm se concentrado na situação atual das águas residuais, e a pesquisa sobre a reutilização de águas residuais após o tratamento tem sido eficaz. O pesquisador grego Stamatis Tsimas estudou as características composicionais das águas residuais produzidas por usinas de betão pré-misturado e as usou para se misturar com água fresco na produção de betão [18], pesquisadores do Kuwait estudaram a aplicação de diferentes níveis de tratamento de águas residuais de estações de tratamento de águas residuais na área Reqqa em betão[19].

2.2.2. Agregados leves

Na norma de EN 13055 [20], os agregados com massa volúmica inferior a 2.000 kg/m^3 são definidos como agregados leves. O agregado leve pode ser natural (pedra-pomes, cinza vulcânica, etc.), artificial (argila expandida, cinza volante expandida e xisto expandido etc.) ou reciclado (parte dos resíduos industriais ou construção e demolição [21] etc.). O agregado desempenha um papel de suporte no betão, aumenta a resistência do betão e, ao mesmo tempo, reduz a quantidade de cimento. Geralmente, a quantidade de agregado é responsável por 70% -80% da massa total do betão.

Da mesma forma, a graduação do agregado, a densidade e a absorção de água no betão leve também afetam o desempenho do betão leve. Na seleção do tamanho máximo de partícula do agregado, a estrutura porosa do próprio agregado levará a resistência e estabilidade de volume insuficientes. Portanto, o tamanho máximo de partícula do agregado leve é melhor não exceder 20 mm; a areia do rio é a melhor escolha para o agregado de preenchimento fino.

Neste estudo, o agregado leve artificial que usamos é argila expandida (tamanho de partícula 2-20mm) como referência basicamente. As matérias-primas para a produção de AE incluem

principalmente argila, resíduos industriais e lodo de rio. Em geral, o processo de produção inclui principalmente a aquisição de matéria-prima, sistema de alimentação e pelletização, sistema de coleta de pó de forno, sistema de calcinação e sistema de triagem de produtos finais (Figura 2.1). Na parte de desempenho, de um modo geral, a argila tem uma taxa de expansão maior, uma densidade aparente pequena e bom desempenho de isolamento térmico, mas sua resistência à compressão relativa do cilindro é baixa. Pode ser usado para produzir componentes estruturais não resistentes.

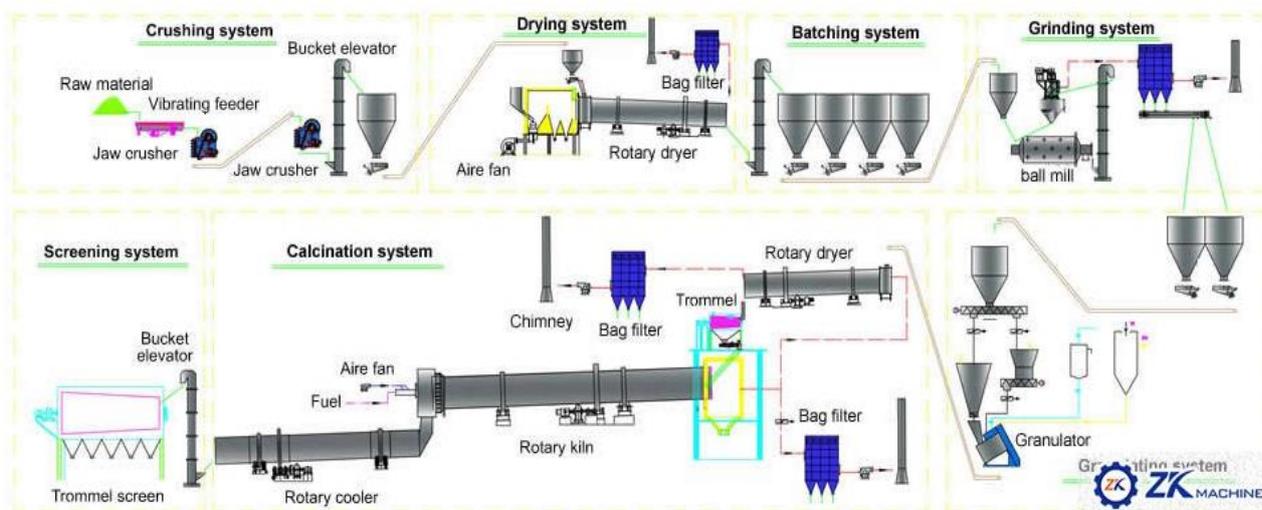


Figura 2.1 - O processo de produção de argila expandida [22]

2.2.3. Agregados finos

Na norma NP EN 12620 [23], designação do agregado em termos das aberturas do peneiro inferior (d) e do superior (D), no caso que $D \leq 4\text{mm}$, é definido como o agregado fino. Tem vários tipos de agregados finos, por exemplo a areia do rio, a areia offshore [24], granito fino triturado [25] e outro tipo da areia das residuais industriais [26] etc. Neste estudo, usamos a areia do rio.

A areia do rio é um tipo de agregado fino natural, que é produzida por repetidas colisões e fricções de pedras naturais sob a força da água por um longo tempo em seu estado natural. As partículas de areia do rio são lisas, relativamente limpas e têm uma grande variedade de fontes. A função da areia do rio é preencher os vazios entre os agregados e tornar o betão mais denso.

Além disso, forma argamassa com pasta de cimento para melhorar a trabalhabilidade e a fluidez do betão.

2.2.4. Ligantes

Qualquer coisa que é finamente moída em um pó e se torna uma pasta plástica após a adição de uma quantidade adequada de água, pode ser endurecida no ar ou na água e pode ser um material de cimentação hidráulica que pode unir areia, pedra e outros materiais volumosos ou fibrosos, coletivamente referidos como cimento. De acordo com sua composição, existem cimento Portland (CEM I), cimento aluminoso, cimento sulfoaluminado, cimento fluoroaluminado, cimento ferroaluminado e cimento com pouco ou nenhum clínquer. Na China, de acordo com a sua utilização e desempenho, divide-se em três categorias: cimento geral, cimento profissional e cimento especial. O cimento Portland (CEM I) é mais usado no mundo, e é composto principalmente de clínquer de cimento Portland (os principais componentes são matérias-primas siliciosas e de cálcio) e quantidades adequadas de gesso (ou outros materiais mistos) após a quebrado e calcinado. O clínquer de cimento calcinado é composto principalmente de forno rotativo e forno vertical, sendo o mais avançado o forno rotativo. A tabela 2.2 a seguir mostra o processo básico de formação de cimento Portland:

Tabela 2.2 - O processo de formação de cimento Portland

Nome de processo	Temperatura (°C)	produto de reação
Desidratação de argila	25 - 600	H ₂ O e 2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃
Decomposição de carbonato	500 - 1000	CaO (de 2% a 17%)
Decomposição de aluminossilicato	660 - 950	SiO ₂ +Al ₂ O ₃
Reação de fase sólida	550 - 1280	C ₂ S+C ₁ 2A ₇ +C ₃ A+C ₂ (A,F)+C ₄ AF
Sinterização de fase líquida	1280 - 1450	C ₃ S+C ₂ S
Cristalização por resfriamento	1300 - 1000	C ₃ S+C ₂ S+C ₃ A+C ₄ AF

O cimento tornou-se o material importante na construção e engenharia. Segundo as estatísticas, em 2030, a produção global de cimento chegará a 5 bilhões de toneladas, 5 vezes a de 1990. Por outro lado, o aumento do consumo de cimento não reflete apenas a prosperidade da economia de mercado, mas também a destruição do meio ambiente pelos resíduos produzidos pela produção de cimento, especialmente a geração e emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa (Cada tonelada de cimento produz 0,65-0,95 toneladas de CO₂) [27].

Em resposta a este fenómeno, sob a coordenação das Nações Unidas, países de todo o mundo chegaram a um acordo e diferentes governos emitiram políticas correspondentes para reduzir

a poluição ambiental na indústria do cimento. Da mesma forma, alguns pesquisadores usam suas próprias habilidades para participar de o processo e ajudar a cimentar de diferentes maneiras. Alguns pesquisadores misturam cinzas volantes e sílica ativa de resíduos industriais no cimento [28]. Alguns pesquisadores melhoram a tecnologia de produção de cimento existente para aumentar a eficiência e alcançar objetivos de redução de emissões [29][30]. Alguns pesquisadores optam por usar em a preparação do betão, a adição ou outros resíduos industriais são usados para substituir parte do consumo de cimento para melhorar a eficiência de aplicação do cimento [31].

2.2.5. Adjuvante

Nas normas NP EN 934-2 e NP EN 206-1, os adjuvantes são definidos como um produto químico que é adicionado antes ou durante a mistura do betão, que pode alterar significativamente as propriedades do betão fresco ou endurecido. Na norma EN 934-2, a quantidade de mistura não é grande, geralmente não mais do que 5% da quantidade de cimento.

Os adjuvantes são frequentemente usados na engenharia, principalmente para atingir algum desempenho exigido sob a premissa de redução do custo de produção de betão. Portanto, existem diferentes tipos de adjuvantes para realizar diferentes funções, os principais são os apresentados na tabela 2.3:

Tabela 2.3 -Alguns adjuvantes comuns

Adjuvantes	Características
Superplastificante	Otimiza o arranjo natural das moléculas de água e de cimento, aumenta a área de contato entre as duas e melhora eficiência de uso.
Introdutores de ar	Melhorar a capacidade do betão de resistir aos efeitos dos ciclos de gelo-degelo.
Aceleradores	Em baixas temperaturas, o tempo de cura do betão pode ser reduzido.
Inibidores de corrosão	Impedir ou reduzir a corrosão do betão.

Nos adjuvantes, o mais comumente usado é o superplastificante que é de grande importância para o betão fresco. Do ponto de vista do pessoal da construção, pode controlar melhor a trabalhabilidade do betão [32]; do ponto de vista da otimização de recursos, pode economizar recursos hídricos e fazer a reação de hidratação do cimento mais eficiente. A seguir vai-se mostrar o princípio de funcionamento do superplastificante.

Quando o cimento é misturado à água, as partículas de cimento não ficam uniformemente suspensas na água, mas agregadas em micelas e depositadas, fenômeno denominado floculação (Figura 2.2). As micelas são envoltas em humidade, o que afeta a fluidez da pasta. Porém, para se obter a fluidez necessária, é necessário aumentar o consumo de água durante a mistura, o que não é necessário para a hidratação do cimento, pois o excesso de água trará diversos efeitos adversos ao betão endurecido.

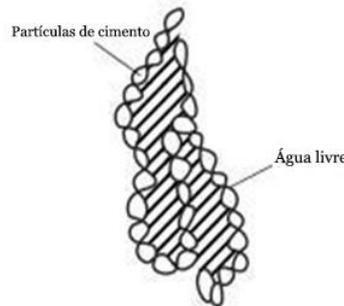


Figura 2.2 - Estrutura de floculação de cimento

Quando o superplastificante é adicionado, devido à estrutura molecular de dois estágios, a molécula se alinha rapidamente na superfície das partículas de cimento ou produtos de hidratação inicial (Figura 2.3) para formar um filme de adsorção monomolecular, o que os faz transportar a mesma carga e gerar um potencial negativo uniforme. Como resultado, as partículas de cimento se repelem e partem, e as micelas floculadas são quebradas, liberando a humidade originalmente envolvida. Portanto, a fluidez da mistura é aumentada.

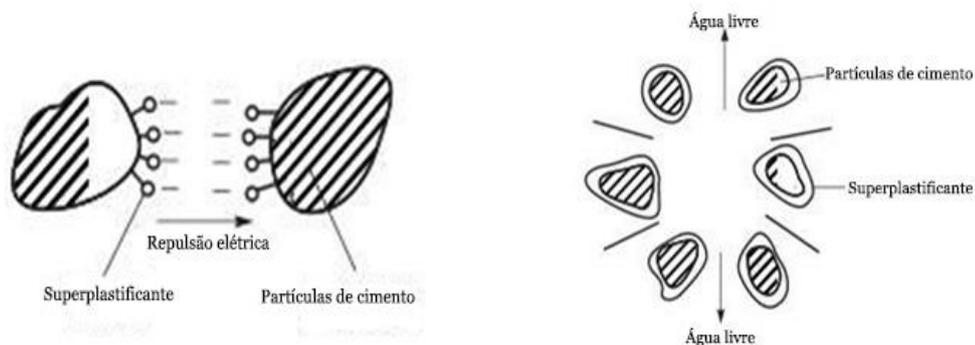


Figura 2.3 - Princípio de funcionamento do superplastificante

2.2.6. Resíduos de fundição

A fundição é o processo pelo qual os metais ou ligas metálicas em estado líquido (fundido) (Figura 2.4) são vazados em um molde para a fabricação dos mais variados tipos de peças, objetos decorativos, joias/bijuterias, carcaças de máquinas, lingotes e outros. Em muitos casos, a fundição é o processo mais simples e económico de se produzir uma peça, principalmente quando esta é de grande porte, de geometria intrincada ou com canais internos e cavidades.



Figura 2.4 - Vazamento de metal fundido

Portanto, uma etapa importante na realização da fundição é a escolha de modelagem para fundição. O molde de fundição é uma ferramenta importante para obter a forma e o tamanho das peças fundidas. Portanto, existem os moldes de fundição de diferentes materiais para diferentes processos de fundição. Os moldes cerâmicos são amplamente utilizados devido à sua excelente resistência a altas temperaturas e matérias-primas baratas e fáceis de obter. A composição do material de molde cerâmico é principalmente uma mistura de areia, argila, água e ligante.

Vazado o metal fundido no molde, após um certo período de resfriamento e solidificação, precisamos quebrar o molde para obter os fundidos acabados. No entanto, o molde quebrado acabará se transformando em resíduo sólido. De acordo com as estatísticas, cada tonelada de peças produzidas produzirá cerca de uma tonelada de resíduos de molde. Portanto, através de métodos experimentais, procuramos aplicar estes resíduos de moldes cerâmicos de fundição (RF) ao betão leve. É claro que os pesquisadores sempre participaram dessa pesquisa, por exemplo, Yucel Guney e outros na Turquia usaram RF em betão de alta resistência para obter

o efeito de substituir 15% da areia fina natural [2]; Frank, um pesquisador sul-africano, misturou 40% do agregado original por RF em tijolos para construir um modelo de estrutura de alvenaria económica e ecologicamente correto [33].

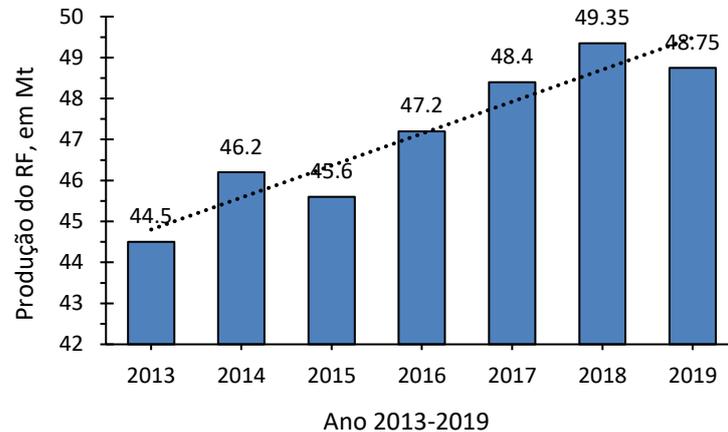


Figura 2.5 - Produção de RF da China de ano 2013 a 2019

De acordo com as estatísticas da China Association, tem 30.000 empresas de fundição na China, ocupando o primeiro lugar no mundo por muitos anos consecutivos desde 2000, com uma produção de 44,5 milhões de toneladas em 2013, representando cerca de 40% do volume mundial. A produção de RF da China de 2013 a 2019 é mostrada na figura 2.5. Pois, o que queremos alcançar nesta pesquisa é substituir o agregado de betão leve por RF ao máximo, e fazer betão leve com excelente desempenho na parte mecânica e durabilidade.

2.3. Caracterização dos constituintes do betão leve

2.3.1. Densidade

A densidade é a medida da massa em um determinado volume e seu método de cálculo é a massa dividida pelo volume, expressa em kg/m^3 no Sistema Internacional de Unidades. Neste estudo, iremos testar a densidade aparente partículas (σ_a), densidade de partícula em uma base seca em estufa (σ_{rd}), densidade de partícula em uma base saturada e seca à superfície (σ_{ssd}). A taxa de absorção de água (WA24) representa a quantidade física do grau de absorção de água de um objeto sob pressão atmosférica normal, expressa como uma percentagem. De acordo a norma EN 1097-6 [34], calculados pelas expressões seguintes:

$$\sigma_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} (kg \cdot m^{-3}) \quad 2.1$$

$$\sigma_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} (kg \cdot m^{-3}) \quad 2.2$$

$$\sigma_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} (kg \cdot m^{-3}) \quad 2.3$$

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4} (\%) \quad 2.4$$

Em que:

- M1: Massa da amostra saturada com a superfície seca (g)
- M2: Massa do picnómetro com amostra saturada com água (g)
- M3: Massa do picnómetro com água (g)
- M4: Massa do provete seco (g)
- ρ_w : Densidade da água na temperatura registada quando M₂ foi determinado.

Neste ensaio, os equipamentos usados são a estufa, o picnómetro e a balança. E de acordo a norma EN 1097-6 [34], os passos experimentais foram seguintes:

1. Submergi as amostras na água durante tempo necessário até à estabilização da massa do provete;
2. Pesou-se o picnómetro cheio da água, em g, registrou-se o M3;
3. Retirou-se da água uma certa quantidade de amostra saturada, realizou-se a sua limpeza da humidade da superfície com um pano húmido, em seguida foi colocado no picnómetro e pesou-se a quantidade total, em g, registrando-se o M1;
4. Com base na etapa anterior, encheu-se o picnómetro com água e pesou-se o peso total, em g, registrando-o como o M2;
5. Com base na etapa anterior, retirou-se a amostra do picnómetro, colocou-se na estufa por 24 horas com temperatura $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e de seguida realizou-se a pesagem da massa seca, em g, registrando-se como M4.

2.3.2. Teor de humidade

A definição do teor de humidade de um material e a interpretação dos diferentes limites estabelecidos em função da presença de humidade são os fatores básicos para entender a importância de sua medição. Os materiais de construção são geralmente porosos, então o conteúdo das moléculas de água no ar, fenómenos capilares ou o contato do material com a água afetarão o teor de humidade do material. Quando o teor de humidade atinge o máximo, é a taxa de absorção de água de o material. Então, quando sabemos o teor de umidade do material em condições normais de trabalho, podemos compará-lo com o teor de umidade do material na aplicação real para entender o desempenho de trabalho e o estado do material. O mais comum é que, quando o teor de humidade é grande, o módulo de elasticidade e os danos do material são muito afetados pela temperatura [35].

O teor de humidade é um indicador da quantidade de água presente num dado material, expresso em percentagem. Neste estudo, usamos teor de humidade (w) para explicar os teores de humidade de betões leves. Mediante a quantidade de água que um material contém, o teor de humidade pode ser determinado pelas relações seguintes:

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100 \quad (\%) \quad 2.5$$

Em que:

- m_h – Massa da amostra húmida (g)
- m_s – Massa da amostra seca (g)

De acordo da norma NP EN 1097-5 [36], o ensaio vai ser realizado por aos passos experimentais seguintes:

1. Retirou-se das amostras a água superficial, no qual se utilizou um pano húmido para a sua limpeza, pesou-se as amostras, em g, registou-se como m_h ;
2. As amostras foram colocadas num copo de cerâmica e submetidas a um forno de micro-ondas durante 15 minutos;
3. Retirou-se as amostras e resfriou-se até á temperatura ambiente, pesou-se, em g, registou-se como m_s .

2.3.3. Granulometria

A granulometria é a quantidade de cada nível de dimensão no material a granel composto de diferentes tamanhos de partícula, geralmente expressa em percentagem. A granulometria contínua é composta de níveis ininterruptos de tamanho de partícula e a descontínua é composta de certos níveis de tamanho de partícula. A granulometria de partículas razoáveis é uma forma importante de fazer os ingredientes obterem baixa porosidade. Neste estudo, os diâmetros dos agregados são de 0 a 20mm. De acordo com a norma NP EN 933-1 [37], deve-se preparar 1.5 kg para fazer o ensaio.

Os equipamentos: a balança, os peneiros com diferentes redes (0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16mm), o fundo peneiro, o tabuleiro, a escova, o triturador.

Os passos experimentais:

1. Observar e selecionar sólidos obviamente grandes (principalmente para RF);
2. Retirar a amostra a ser testada, 1,5kg, e colocar no tabuleiro;
3. Empilhar os peneiros da maior para a menor na ordem de suas aberturas;
4. Despejar a amostra no peneiro superior (com a maior abertura) e agitar o peneiro até que as pequenas partículas tenham passado quase completamente (Em teoria, a taxa de transferência de cada camada não deve ultrapassar 0,1% do total.). Se houver muitas amostras, elas podem ser peneiradas em lotes.
5. Retirar o agregado de cada camada do peneiro separadamente e pesar-o. (Antes da pesagem, o peneiro pode ser agitado novamente para garantir a passagem máxima das pequenas partículas).
6. Registrou-se o peso do agregado restante em cada camada do peneiro. E o ensaio válido não ultrapassa 1%, o que é verificado pela seguinte equação:

$$\text{Ensaio válido} = \frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} < 1\% \quad 2.6$$

Em que:

- M_2 - Massa seca após lavagem, em g;
- R_i - O peso do agregado remanescente em cada camada do peneiro, ou seja, retido, em g;
- P - O peso do agregado remanescente no fundo peneiro, em g.

2.4. Características estruturais do betão leve

A composição do betão leve é basicamente a mesma do betão normal, exceto que o agregado leve é usado para substituir o agregado natural no betão normal.

Em termos de impacto dos agregados no betão, existem muitas semelhanças entre agregados leves e agregados comuns nas principais propriedades do betão, como granulometria do agregado, tamanho de partícula, gradação e proporção de areia [38]. A diferença entre o agregado leve e o agregado comum é determinada principalmente pelas características do próprio agregado leve. Comparado com o agregado comum, o agregado leve tem uma estrutura única com peso leve e porosidade interna.

A influência da singularidade do agregado leve no betão se reflete principalmente nos seguintes aspetos:

- (1) Boa eficiência estrutural. No caso do mesmo grau de resistência, a densidade aparente do betão leve é 20%-40% menor do que a dos materiais de betão comuns. A resistência específica do betão leve é menor do que a das estruturas de betão comuns, e a qualidade estrutural é reduzida. O uso de betão leve pode reduzir a seção transversal da estrutura, aumentar a altura da estrutura, aumentar o vão da estrutura e reduzir a quantidade de aço. No caso de um mesmo trecho estrutural, a capacidade de carga estrutural pode ser melhorada devido à redução do peso do betão leve.
- (2) Desempenho sísmico forte. O betão leve tem uma forte capacidade de carga dinâmica devido à sua baixa densidade aparente, peso leve e baixo módulo de elasticidade. Sob a ação do sismo, a força sísmica que ele suporta é pequena, a velocidade de transmissão da onda de vibração também é lenta e o período de auto- vibração da estrutura é longo, a energia do choque é absorvida rapidamente e a absorção do choque é notável.
- (3) Boa resistência ao fogo. O betão leve tem uma baixa condutividade térmica e uma grande resistência térmica. Sob a ação da alta temperatura, a taxa de transferência de temperatura de fora para dentro será muito lenta. Para componentes da mesma classe de resistência ao fogo, a espessura das lajes de betão leve pode ser reduzida em 20% a 30% em comparação com as lajes de betão comuns.
- (4) Boa durabilidade. Como o betão leve tem excelente ligação entre o agregado leve e a argamassa na zona de transição da interface. Esta zona é um dos fatores importantes que afetam a durabilidade do betão, portanto, o betão leve tem baixa permeabilidade, boa

resistência ao congelamento e resistência a vários tipos de erosão química. Além disso, os componentes de agregado leve e argamassa apresentam boa compatibilidade elástica, com menor tensão interna e microfissuras [39].

(5) A economia é excelente. Embora o custo por metro cúbico de betão leve seja superior ao do betão comum do mesmo nível de resistência, com a melhoria da tecnologia de produção de agregado leve artificial e a expansão das fontes, o custo do agregado leve será bastante reduzido. Do ponto de vista estrutural, a seção transversal da estrutura também será reduzida, reduzindo assim o peso da estrutura, aumentando a área de uso, reduzindo a quantidade de aço, e reduzindo o custo básico, por isso tem um significativo e abrangente benefício econômico.

2.5. Aplicação do betão leve na construção

Entre os países do mundo, Estados Unidos, Alemanha, Noruega e Japão são os que mais usam betão leve, e sua tecnologia é mais avançada do que noutros países. Os Estados Unidos e a Alemanha usaram com sucesso o betão leve para construir centenas de pontes, e ele também é amplamente utilizado em edifícios altos [40].

A Noruega é um dos países mais avançados do mundo para aplicações estruturais de betão leve. Desde a década de 1980, mais de dez pontes foram construídas com betão leve com graus de resistência de LC55 ~ LC60. A mais famosa é a Ponte Stolma (Figura 2.6) construída em 1999 [41], que era a mais longa estrutura de betão armado contínua do mundo naquela época. O vão principal da ponte é de 301 metros, e o meio do vão principal é de 184m usando betão leve com LC60. Além disso, também é amplamente utilizado em projetos de engenharia, como edifícios altos e plataformas de perfuração de petróleo na Noruega.



Figura 2.6 - Ponte Stolma [42]

Nos Estados Unidos, existe uma vasta experiência na preparação de betão leve e na pesquisa e desenvolvimento de agregados leves artificiais. O betão leve também tem sido amplamente utilizado em projetos práticos. A mais antiga argila expandida foi feita pelo engenheiro americano S. J. Hayde [43] na década de 1920 usando um forno rotativo. Além disso, em termos de aplicação, a Ponte Benicia-Martinez [44] na Califórnia usa betão leve em que a resistência à compressão é de 45 MPa no dia 28 e a densidade aparente seca é de 1920 kg/m³. A tecnologia avançada combinada com o desempenho superior do betão leve também é amplamente utilizada em prédios altos, plataformas de petróleo e outras estruturas de edifícios [45].

A China é atualmente um dos principais países com construção de infraestruturas em betão leve no mundo. Nos últimos anos, o volume de negócios deste país espalhou-se por todo o mundo, o que também promoveu o rápido desenvolvimento de máquinas de construção, materiais de construção e tecnologia de construção e outras indústrias relacionadas. Em 1956, o primeiro lote de argila expandida artificial foi produzido com sucesso na província de Shandong, China, usando um forno rotativo para este fim. A pesquisa e a aplicação de betão leve na China começaram na década de 1950. Desde a década de 1970, o processo de industrialização e urbanização da China se desenvolveu rapidamente, o que também levou à produção de uma grande quantidade de resíduos industriais e urbanos [46]. Mais tarde, os investigadores usaram esses resíduos em betão para substituir agregados naturais tradicionais e agregado leve artificial. Este agregado é utilizado em betão verde, reduzindo assim o consumo de recursos naturais agregados e protegendo o meio ambiente [47].

Em Portugal, apenas é utilizada a argila expandida com a designação comercial LECA e, dentro dos limites de resistência disponíveis, a utilização de betão com agregados leves em aplicações no terreno ainda não consegue obter o efeito pretendido. Um dos principais fatores que levam Portugal a reduzir a implantação de betão leve é a falta de empresas profissionais de betão pronto [48]. No entanto, a aplicação prática do betão leve tem sido desenvolvida na prática, como a pala da cobertura do Pavilhão de Portugal (Figura 2.7- a), a reabilitação da Ponte de Fão (Figura 2.7 - b) [49].



Figura 2.7 – (a)Pavilhão de Portugal [50] e (b) Ponte de Fão [51]

3. MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.1. Materiais

3.1.1. Água

Neste estudo, usamos água potável do laboratório.

3.1.2. Cimento

Neste estudo, de acordo com a norma NP EN 197-1 [52], usamos cimento de CEM I 42,5R, produzido por empresa SECIL em Portugal. Na tabela 3.1 apresentam-se as características do cimento.

Tabela 3.1 - Características de CEM I 42,5R [53]

Propriedades	Método de ensaio	Valor Especificado
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 mm
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm
Resistência aos primeiros dias (MPa)	Resistência de referência (MPa)	Densidade
2 dias	7 dias	28 dias
≥20	-	≥42,5 e ≤62,5
		3120kg/m ³

3.1.3. Areia do rio

Neste estudo, usamos areia do rio com dimensão de 0-4mm da empresa Minas de Barqueiros, S.A. Os resultados da sua caracterização mostram-se na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características da areia do rio [54]

Características	Desempenho
Volume de vazios do agregado	44,66%
Absorção de água	0,88%
Dimensão	0 a 4 mm
ρ_a (kg/m ³)	2640
σ_{rd} (kg/m ³)	2580
σ_{ssd} (kg/m ³)	2600
ρ_a (kg/m ³)	1520

3.1.4. Argila Expandida

Neste estudo, usamos dois tipos das dimensões de AE (Figura 3.1) fornecido pela empresa Leca®, um é Leca2-10 e outro é Leca10-20. Ambas as dimensões de AE estão em conformidade com a Marcação CE.



Figura 3.1 - Argila Expandida (AE)

Utilizando o picnómetro, medimos as densidades e a absorção de água de dois tipos de dimensões das Lecas, cujos resultados são mostrados na figura 3.2.

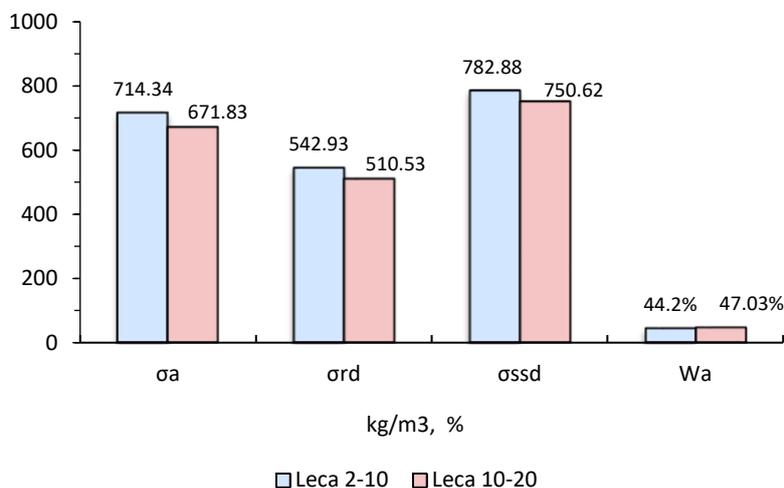


Figura 3.2 - Densidades e Absorção da água de Leca 2-10 e Leca 10-20

Por meio de ensaios de peneiramento, determinamos a graduação de partículas de dois tipos das Lecas. O ensaio é válido porque o erro foi de 0,3% para Leca 2-10 e 0,4% para Leca 10-20, ambos dentro do ensaio válido de 1%. Na tabela 3.3 mostra-se o resultado de análise

granulométrica e na figura 3.3 mostra-se a curva de gradação de partículas, de acordo com a norma NP EN 933-1 [37].

Tabela 3.3 - O resultado de análise granulométrica da Leca 2-10 e Leca 10-20

Dimensões (mm)	Leca 2-10	Leca 10-20
	% Cumulativa passado	
31.5	100	100
16	100	96
8	46	3
4	2	2
2	2	2
1	2	2
0.5	2	2
0.25	2	2
0.125	2	1
0.063	1	1

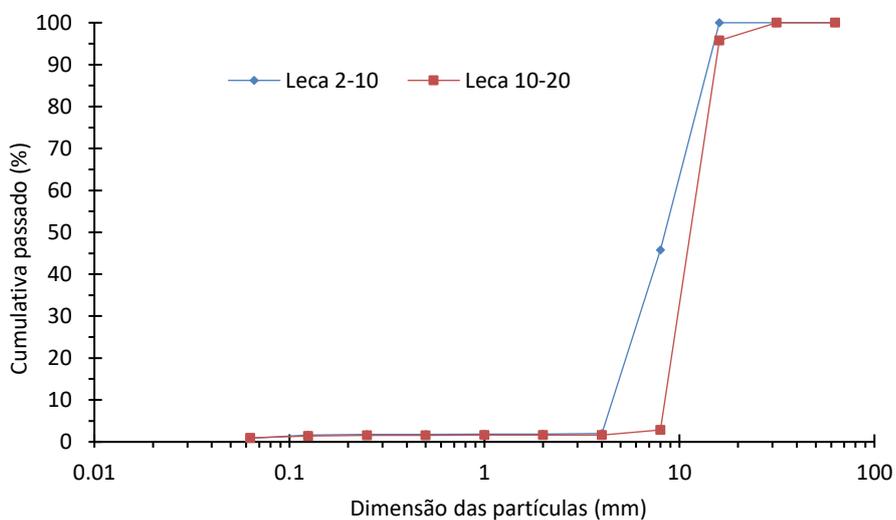


Figura 3.3 - Curva de gradação de partículas de Leca 2-10 e Leca 10-20

Neste estudo optou-se por realizar a espectrometria de fluorescência de Raios X para se obter a composição da argila expandida, tal como observamos na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Composição de Argila Expandida

ELEMENTOS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	S	MnO	P ₂ O ₅
AMOSTRAS (%)	64,36	23,46	1,12	8,82	0,04	1,89	0,03	0,13	0,16

3.1.5. Resíduos de fundição

Neste estudo, foram usados os resíduos de moldes de cerâmica da fundição, como podemos observar na figura 3.4. Estes são provenientes da empresa Zollern & Comandita em Portugal. O processo de fundição utilizado na empresa é o processo de cera perdida, que permite a obtenção de peças com elevado rigor dimensional. Neste processo, uma carapaça cerâmica é produzida em torno de um modelo em cera. Por aquecimento, a cera evapora, deixando, no seu lugar, uma cavidade que irá ser preenchida com metal líquido. A empresa em causa produz peças em ligas ferrosas, mas também em ligas não ferrosas. As características das carapaças cerâmicas não diferem, pelo que o resíduo utilizado é característico da produção normal da empresa.



Figura 3.4 - Resíduos de moldes de cerâmica de fundição (RF)

Para medir as densidades e a absorção de água dos resíduos de fundição, utilizou-se o mesmo método realizado no material da Leca (método do picnómetro), cujo resultado é mostrado na figura 3.5.

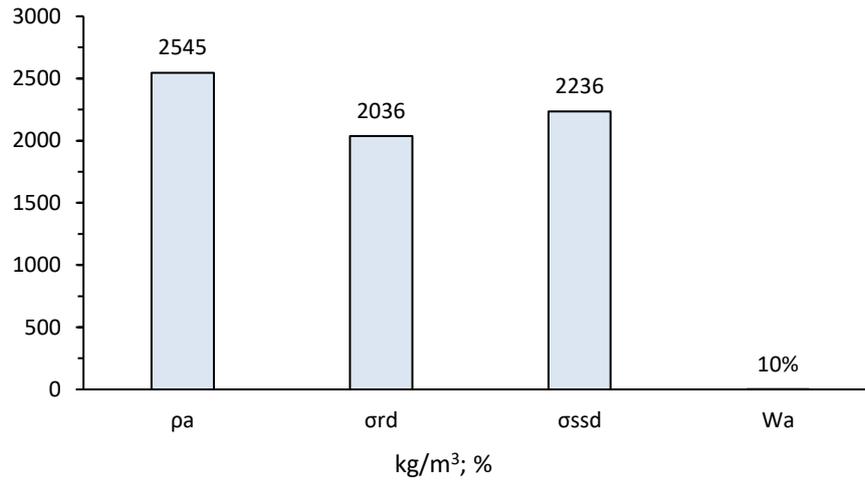


Figura 3.5 - Características do RF, nomeadamente as densidades e a absorção de água

Procurou-se substituir no estudo a Leca 2-10 mm e 10-20mm pelo resíduo de fundição no mesmo tamanho de partícula, sendo esse intervalo de partículas de 0-20 mm. Num primeiro instante efetuou-se a medição da distribuição do tamanho das partículas no estado natural, tal como se verifica na tabela 3.5.

Tabela 3.5 - O resultado de análise granulométrica do RF

Dimensões (mm)	RF original	RF de 0-20mm
	% Cumulativa passado	
63	100	100
31.5	63	100
16	35	93
8	15	71
4	8	45
2	6	34
1	5	22
0.5	2	11
0.25	2	7
0.125	1	2
0.063	0	0

Após a verificação da granulometria, verificou-se que seria necessário recorrer a um processo de peneiração, utilizando um peneiro de 20 mm para separar as partículas maiores que 20 mm.

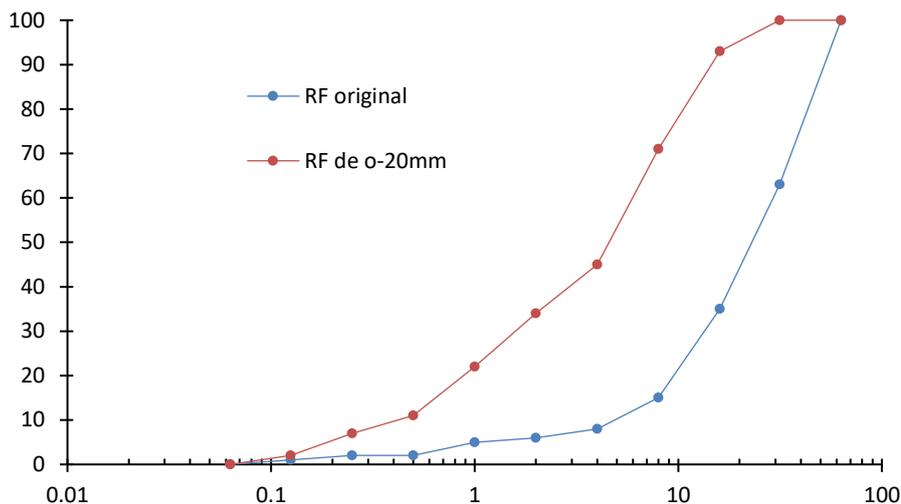


Figura 3.6 - Curva de gradação de partículas de RF

Todo o material retido no peneiro de 20 mm, foi necessário triturar as partículas grandes para o tamanho de partícula pretendidas do estudo, e finalmente, efetuar a distribuição do tamanho de partícula com a realização de uma granulometria, tal como mostrada na figura 3.6.

A composição do RF obtida por espectrometria de fluorescência de raios X, mostra-se na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Composição de RF

ELEMENTOS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	Cr	Ni
AMOSTRAS (%)	74,3	20,0	4,2	0,66	0,66	0,12	0,07	0,08	0,02	<0,003

3.1.6. Superplastificante (SP)

No estudo dos betões leves com RF foi utilizado um SP específico da empresa BASF Portuguesa, S.A, com as seguintes características na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Parâmetros do MasterGlenium SKY 617 [55]

Características físicas e químicas	Normas	Valores específicos
Aspeto físico	Visual	Líquido castanho
Densidade (20°C)	ISO 758	1,041±0.02 g/cm ³
PH	ISO 4316	5,3±1
Extrato seco	UNE EN 480-8	18±1,8 %
Teor de cloretos	UNE EN 480-10	≤0,1%

3.2. Procedimentos de ensaio

3.2.1. Abaixamento

O ensaio de abaixamento do betão é o método mais comum e utilizado para avaliar o desempenho de trabalhabilidade nas obras, refere-se principalmente ao desempenho de plastificação e bombeamento do betão. Os fatores que afetam o abaixamento do betão incluem principalmente a dimensão de agregados, teor de água, adjuvantes, temperatura, etc.

O abaixamento do betão deve ser fixado de acordo com a seção estrutural do edifício, o tamanho aço e o seu volume na estrutura, método e distância de transporte, método de vazamento, capacidade de vibração e condições climáticas. Portanto, o valor de abaixamento deve ser considerado na fase de projeto da mistura de betão.

As classes do abaixamento do betão são divididas em cinco, como definidas na norma NP EN 206-1 2007 [3], tal como apresentado na tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Classes de abaixamento

Classe	Abaixamento em mm
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	≥ 220

Para a execução do ensaio de abaixamento foram utilizados diversos equipamentos, nomeadamente um cone, o tabuleiro, a barra de aço e a régua (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Os equipamentos usados no ensaio de abaixamento

A realização do ensaio seguir as seguintes etapas:

1. Molhou-se o cone e o tabuleiro com água para reduzir o atrito no estado seco;
2. O processo foi efetuado com o enchimento de betão leve em três camadas no cone, apiloando cada camada com uma barra de aço, no qual se realizou a compactação com 25 vezes dentro do cone. Após essa compactação, nivelou-se o topo do betão;
3. Efetuou-se o levantamento do cone durante um intervalo de tempo de 5 a 10 segundos;
4. Após o processo, usou-se uma régua para medir a distância entre o topo do betão e a altura do cone no qual se aferiu o valor de abaixamento, como observamos na figura 3.8.

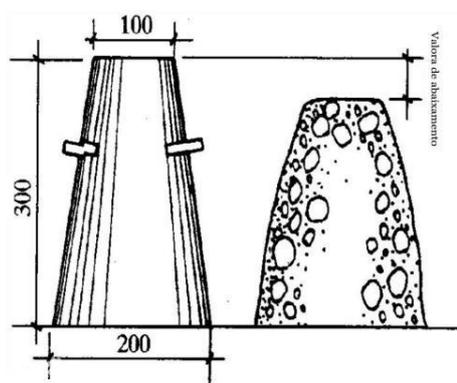


Figura 3.8 - Medição do valor de abaixamento

3.2.2. Absorção por imersão

A absorção de água do betão endurecido é um indicador importante para analisar a durabilidade. O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado segundo a norma do LNEC E 394 [56].

Foram utilizados neste estudo 12 provetes ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$), os quais foram curados por 28 dias num ambiente a 90% de humidade e posteriormente ensaiados. As massas dos provetes foram determinadas de acordo com a norma NP EN 12390-7 [57].

Processo do ensaio:

1. Foram colocados os provetes curados na estufa a uma temperatura de aproximadamente $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Após 24 horas mediu-se a variação de massa, após diferentes ciclos de medições

de massas intercalares de 24h e com uma massa inferior a 0,2%, confirmou-se a massa constante;

2. Após o processo anterior, registou-se a massa constante seca (m_3), em gramas.
3. Colocou-se de seguida os provetes num recipiente cheio de água, no qual ficaram submergidos completamente;
4. Depois de 24h, após se verificar as massas constantes de saturação (erro $\leq 1\%$), realizou-se a pesagem dos provetes
5. Pesou-se os provetes saturados não imerso (m_1), em gramas;
6. Realizou-se também a pesagem do provete saturado imerso em água, como podemos observar na figura 3.9, registou-se a pesagem (m_2), em gramas.



Figura 3.9 - Pesagem do provete saturado imerso em água

Por fim, calculou-se a absorção de água por imersão (A_i) através da equação, em percentagem:

$$A_i = \left(\frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \right) * 100 \quad 3.1$$

Em que:

- m_1 – Massa do provete saturado no ar, em g;
- m_2 – Massa do provete saturado dentro de água, em g;
- m_3 – Massa do provete seco, em g.

3.2.3. Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade refere-se ao desempenho do betão no atravessamento do material, que está relacionado a fatores como o grau de hidratação do cimento e a idade do período de cura. A absorção por capilaridade é um índice de desempenho de transporte de água por canais interligados no material, com alguma facilidade de realização.

No ensaio, foram utilizados provetes cúbicos com dimensões de 100x100x100 mm³, no qual foi realizado a cura com 28 dias de idade. O processo do ensaio foi determinado de acordo com a norma LNEC E 393 [58].

Processo do ensaio:

1. Secou-se os provetes na estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$ até a massa constante (erro $\leq 1\%$);
2. Colocou-se os provetes num recipiente com água até uma altura de aproximadamente 5mm dos provetes. Deve-se acautelar que a distância entre os provetes deve ser mantida, além disso, os provetes e a caixa plástica não podem estar em contato direto. Sendo assim, deve-se assegurar uma distância entre o fundo do provete e do recipiente com uma malha de borracha, colocada entre os provetes e a caixa plástica, figura 3.10;
3. Deve-se iniciar a cronometro quando se verifica o contato da água com o provete, além desse fato também é importante manter a tampa fechada para que não ocorra evaporação da água assim como manter o ensaio numa temperatura constante;
4. As pesagens dos provetes, figura 3.11, devem ocorrer segundo a norma nos seguintes períodos: 3,6,24,72 horas, no entanto optou-se por efetuar um desvio à norma e realizando-se mais pesagens em determinados tempos, aos 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min, 240 min, 300 min, 360 min, 420 min, 24h, 26h, 30h, 34h, 52h, 54h, 57h, 60h, 72h, 76h, 81h, 144h, 148h, 152h, 168h, 172h, 176h, 193h, 197h, 200h, 219h, 224h, 243h, 289h, 294h e 340h.

Ao longo do ensaio foi-se verificando o nível da água na caixa, mantendo-se o 5mm em que provete fica imerso, caso contrário, adicionar água de acordo com a necessidade;



Figura 3.10 - Os provetes na caixa plástica

A absorção por capilaridade é determinada através da seguinte equação:

$$A_c = \left(\frac{m_i - m_0}{A} \right) * 1000 \quad 3.2$$

Em que:

- A_c – absorção de água por capilaridade (kg/m^2).
- m_i - massa do provete num determinado tempo i (g);
- m_0 - massa do provete seco (g);
- A – área da superfície inferior em contacto com a água (mm^2).

O coeficiente de absorção por capilaridade é determinado através do declive da reta para um determinado intervalo de valores de absorção por capilaridade em relação a um determinado intervalo de tempo. O coeficiente de absorção por capilaridade é apresentado em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$.



Figura 3.11 - Pesagem do provete relativamente no ensaio de capilaridade

3.2.4. Resistência à compressão

No ensaio de resistência à compressão do betão foram utilizados provetes cúbicos (150x150x150 mm³) que ficaram numa cura por 28 dias. De acordo com a norma NP EN 12390-3 [59], deve-se colocar os provetes na máquina de compressão devidamente centrados, tal como na figura 3.12, foi definida uma velocidade de 13,5 kN/s. O ensaio foi concluído quando ocorreu rotura do provete, anotando a força máxima em kN.



Figura 3.12 - Ensaio de resistência à compressão

Por fim, efetuou-se uma análise dos resultados, comparando as suas médias dos valores de cada tipo dos provetes para cada tipo de mistura. A resistência à compressão é determinada através da seguinte equação, com uma exatidão de 0,1MPa:

$$f_{cu,k} = \frac{F}{A} \quad 3.3$$

Em que:

- $f_{cu,k}$ – Resistência à compressão [N/mm²];
- F – Valor da carga máxima aplicada ao provete[N];
- A – Área de aplicação da carga [mm²].

3.2.5. Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-5 [60]. Usou-se provetes com dimensões de 100x100x425 mm³ curados com 28 dias. Estes foram colocados no equipamento de ensaio devidamente centrado, o suporte inferior está localizado em um terço do provete, e o eixo de pressão superior está centrado no meio do provete (Figura 3.13). Definiu-se uma velocidade constante no intervalo de 0,02-0,05 MPa/s para o ensaio de flexão e no qual foi submetido a uma carga gradualmente crescente até à rotura do provete.



Figura 3.13 - Ensaio à flexão de um provete de betão

A resistência à flexão foi determinada através da equação seguinte:

$$f_{tf} = \frac{3F \cdot L}{2Bh^2} \quad 3.4$$

Em que:

- f_{tf} – Resistência à flexão [MPa];
- F – Força de rotura à flexão [N];
- L – Distância entre os apoios [mm];
- B – Largura do provete [mm];
- h – Espessura do provete [mm].

3.2.6. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade reflete a relação entre a tensão e a deformação do betão endurecido. Através disto, é possível analisar a relação entre a resistência do betão e sua deformação sob forças externas.

Sendo assim, o módulo de elasticidade do betão avalia a deformabilidade que este material possui quando submetido a forças exteriores, dito de outra forma, as estruturas reagem às solicitações impostas, traduzindo-se numa deformação e à forma como se distribuem os esforços.

O módulo de elasticidade secante foi determinado segundo a norma EN 12390-13 [61]. No método descrito nesta norma é possível obterem-se dois tipos de módulo de elasticidade, através da utilização de dois métodos diferentes: o método A e o método B.

A diferença entre os dois métodos consiste substancialmente numa aplicação de uma pré-carga antes de se iniciar a sequência dos ciclos para a determinação do referido módulo de elasticidade.

O método A engloba a obtenção dos dois módulos de elasticidade, o inicial denominado por $E_{c,0}$ e de estabilização, $E_{c,s}$, através da aplicação de três ciclos de pré-carga e três ciclos de carga, sendo este método mais demorado.

O método B traduz-se no processo mais rápido, isto porque consiste em apenas três ciclos de carga. Este método permite, no entanto, a obtenção do módulo de estabilização.

Ambos os métodos A e B de obtenção dos módulos de elasticidade obrigam à realização de um ensaio de resistência à compressão, sendo este de elevada importância, isto porque determina os parâmetros necessários ao procedimento do ensaio mediante os critérios definidos na norma, sendo estes parâmetros:

- F_c - Resistência à compressão dos provetes;
- σ_a - Tensão nominal superior ($f_c/3$);
- σ_b - Tensão nominal inferior: valor entre 10% a 15% de f_c , considerar ($f_c/9$);
- σ_p - Tensão nominal de pré-carga: valor entre 0,5 MPa e σ_b , a considerar 1;
- L_0 - Base do extensômetro, variável para prismas de betão,

Neste ensaio, foram utilizados provetes cilíndricos com uma altura de 200mm e diâmetro de 100mm, de acordo com a norma BS EN 12390-13 [61], apenas deve ser efetuado com provetes que apresentem a relação $2 \leq L/d \leq 4$.

Na obtenção do módulo de elasticidade para todos os provetes, foi adotado o método B, tal como se indica na figura 3.14.

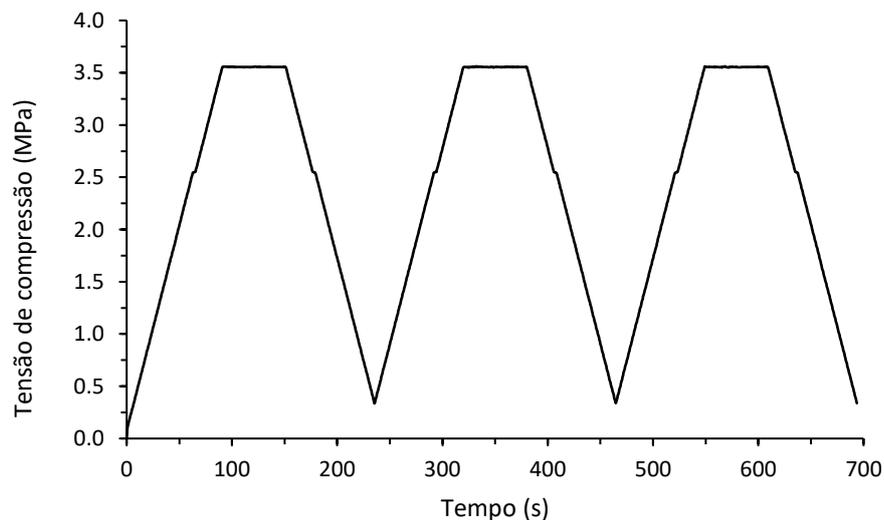


Figura 3.14 - Ciclos de carga e descarga fornecidos pelo equipamento de ensaio

Processo de ensaio:

Os provetes cilíndricos de ensaio foram curados por 28 dias e preparados num equipamento retificador de faces, isto de forma a garantir que as superfícies ficassem paralelas, tal como mostrado (Figura 3.15);



Figura 3.15 - Esmerilar os provetes cilíndricos

De acordo com a norma BS EN 12390-13 [61], previamente determina-se a resistência à compressão (F_c) e calcula-se um terço da força (σ_a)

De seguida colocou-se os provetes a ensaiar no equipamento com os devidos instrumentos de medição de deformação. Estes instrumentos foram colocados a um terço da secção do provete, da base e da parte superior do provete, tal como mostrado na Figura 3.16.



Figura 3.16 - Um provete no ensaio de módulo de elasticidade

Foram efetuados três ciclos de carga durante cerca de três minutos e uma pré-carga de 10 kN. O gráfico deste tipo de ensaios é ilustrado na Figura 3.14, sendo o eixo das ordenadas o tempo (s) e o das abcissas a tensão (MPa).

O módulo de elasticidade em compressão, E_c - (GPa), foi calculado com base na equação:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{(\sigma_a - \sigma_b)}{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)} * 10^{-3} \quad 3.5$$

Em que:

- σ_a - Tensão máxima aplicada (1/3 de resistência à compressão), em MPa;
- σ_b - Tensão inicial (0,5MPa), em MPa;
- ε_{an} - Extensão para a tensão σ_a medida no n-ésimo ciclo de carga;
- ε_{bn} - Extensão para a tensão σ_b medida no n-ésimo ciclo de carga.

3.2.7. Resistividade

A resistividade é uma quantidade física usada para expressar as características resistivas de várias substâncias. Ela reflete as propriedades das substâncias que impedem a corrente e está relacionada ao tipo de substância e é afetada pela temperatura. Neste ensaio, o conteúdo de diferentes percentagens de RF é um fator importante que poderá variar o valor de resistividade.

A figura 3.17 mostra o princípio de funcionamento do ensaio de resistividade no betão. O Resipod, este equipamento pode ser usado neste ensaio em 4 pontos, e com uma distância de 38mm por as sondas Wenner adjacentes. Quando a corrente é aplicada às duas sondas externas e a diferença de potencial entre as duas sondas internas é medida. A corrente é transportada pelos íons no fluido dos poros de betão.

De acordo com o procedimento de ensaio LMC-PE-002 [62], poderemos obter uma estimativa da probabilidade de corrosão e a indicação da taxa de corrosão do betão. A resistividade elétrica pode ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\rho = \frac{2\pi aV}{I} \quad 3.6$$

Em que:

- ρ – resistividade elétrica ($\Omega.m$);

- V – Diferença de potencial (V);
- a - Afastamento entre elétrodos (m);
- I – Intensidade de corrente (A).

Para o ensaio foi preparado 4 provetes (um para cada tipo de mistura) com dimensões 150x150x150mm, no qual foi realizado medições nas seis superfícies de cada provete.

Processo de ensaio:

1. Retirou-se a amostra, logo imediatamente procedeu-se à leitura dos dados;
2. Na realização do ensaio procedeu-se à verificação da calibração do equipamento, em seguida, colocou-se as sondas na água a fim de minimizar o erro durante o teste;
3. Com as sondas humedecidas em água previamente colocou-se na superfície do provete efetuando uma ligeira pressão na parede do provete, registando-se o valor da resistividade para cada provete. Após a execução do ensaio deve-se manter de novo as sondas em água;
4. Em cada face do provete realizou-se duas leituras, na direção diagonal do provete, tal como indicado na figura 3.18.

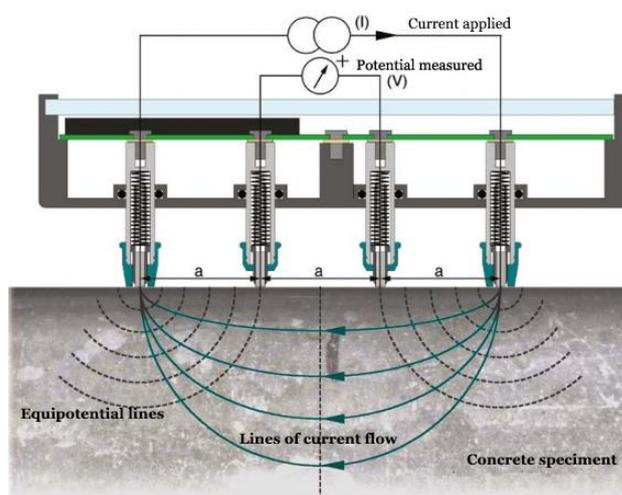


Figura 3.17 - Princípio da medição da resistividade

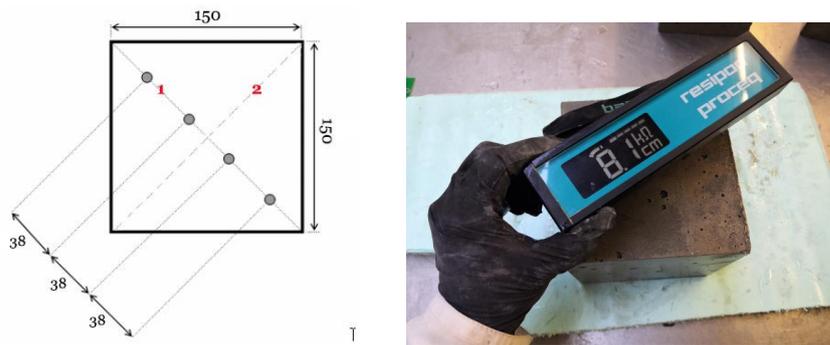


Figura 3.18 - Exemplo de uma medição da resistividade num determinado provete de betão leve

3.2.8. Ultrassons

O ensaio ultrassônico é um método de ensaio não destrutivo. Este ensaio usa as características de reflexão e difração ultrassônica, no qual é observado os dados de velocidade e tempo no detetor ultrassônico, determinando assim possíveis defeitos internos do provete.

O ensaio usa a tecnologia de eco de pulso mais comumente usada em testes ultrassônicos e o método de faces opostas. Sinais elétricos pulsados são gerados pelo detetor ultrassônico e inseridos no transdutor electroestático (gerador de pulso). O chip piezoelétrico do transdutor electroestático emite ondas ultrassônicas pulsadas. Quando as ondas ultrassônicas encontram poros no provete, elas passam por reflexão ou difração e outro caminho de propagação. Eventualmente, ele será recebido pelo chip piezoelétrico do transdutor electroestático (recetor) do outro lado e convertido em um sinal elétrico para transmissão ao detetor ultrassônico (Figura 3.19).

Neste ensaio, de acordo com a NP EN 12504-4 [63], preparou-se provetes com uma dimensão de $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$, usando 3 provetes para cada tipo mistura.

Processo de ensaio:

1. Retirou-se as amostras da cura de 28 dias e realizou-se a limpeza da superfície dos provetes com uma escova de aço;

2. Procedeu-se à calibração dos parâmetros do equipamento com um material calibrador, no qual é conhecido o tempo ultrassónico desse mesmo material, verificando-se o desvio limite de $\pm 2\%$;
3. Aplicou-se um gel lubrificante na superfície de contato do transdutor;
4. Colocou-se os transdutores em cada lado opostos do provete no qual foi efetuado uma ligeira pressão na sua superfície do provete, garantindo assim um bom contato entre o sensor e o betão (Figura 3.20);
5. Registrou-se o resultado de tempo de propagação ultrassônica exibidos no equipamento, para cada provete mediu-se dois valores,

O tempo de propagação ultrassônica no provete, é possível determinar a velocidade de propagação dos ultrassons através da seguinte fórmula:

$$V = \frac{l}{t} \quad 3.7$$

Em que:

- V – Velocidade de propagação dos ultrassons (m/s);
- l – Comprimento de percurso (m);
- t – Tempo que os ultrassons levam a atravessar o comprimento de percurso (μs).

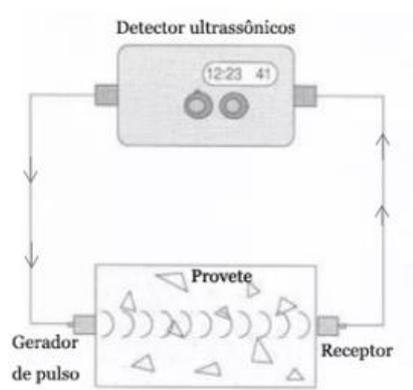


Figura 3.19 - Princípio da medição do detetor ultrassônico

Como apresentado na Figura 3.20, exemplifica-se uma medição dos ultrassons.

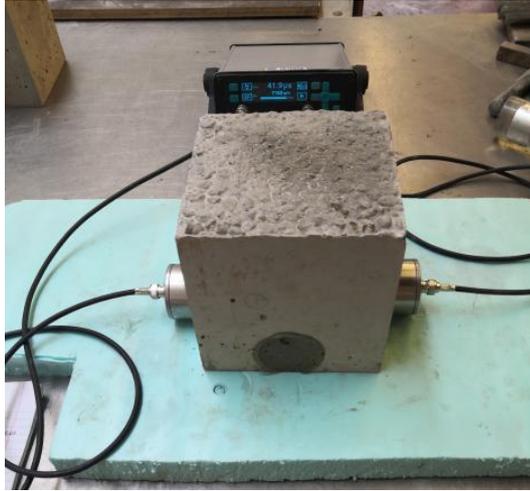


Figura 3.20 - Ensaio de ultrassons a um provete de betão leve

3.2.9. Migração de cloretos em regime não estacionário – CTH

O ensaio de migração de cloretos foi realizado de acordo com a norma LNEC E 463 [64], esta determina o coeficiente de difusão de cloretos no betão. Foram utilizados para este tipo de ensaio provetes cilíndricos com dimensão $\text{Ø}100 \times \text{H}200 \text{mm}$ e tal como anteriormente curados com 28 dias na câmara húmida. Sendo que cada provete foi cortado em 3 peças com dimensão $\text{Ø}100 \times \text{H}50 \pm 2 \text{mm}$, tal como na figura 3.21. As soluções dos reagentes utilizadas foram realizadas numa determinada proporção $\text{NaCl}:\text{H}_2\text{O} - 1:9$ e $\text{NaOH}:\text{H}_2\text{O} - 3:250$.



Figura 3.21 - Os provetes cilíndricos com dimensão $\text{Ø}100 \times \text{H}50 \text{mm}$

Processo de ensaio:

1. Para preparação do ensaio foi necessário cortar os provetes numa dimensão $100 \times H50 \pm 2 \text{mm}$. Foi realizada a limpeza dos provetes com uma escova de aço e um pincel;
2. De acordo com a norma colocou-se os provetes na câmara de vácuo até uma pressão de 10-50 mbar em 15 minutos e em seguida continuou-se o processo de vácuo durante cerca de 3 horas;
3. Após a etapa anterior, adicionou-se uma solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aos provetes em vácuo;
4. Após a etapa anterior desligou-se a bomba de vácuo e manteve-se os provetes submersos por 24h para permitir que a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entre totalmente nos poros do betão;
5. Preparou-se uma solução de 10%NaCl em massa (Solução catódica) e enche-se o recipiente catódico;
6. Colocou-se uma manga de borracha no provete de modo a impermeabilizar as paredes do provete e garantir que a solução anódica e catódica penetrasse num só sentido da secção do mesmo.
7. Preparou-se a solução do NaOH 3643,2g (NaOH:H₂O é 3:250), de seguida colocou-se cerca de 300ml por cada provete a ensaiar, tal como indicado na figura 3.22a (b-anólito);

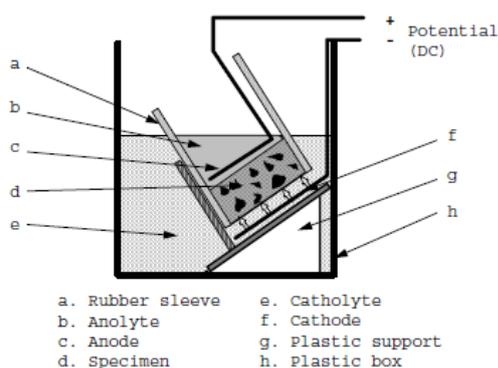


Figura 3.22 - a) Ensaio migração de cloretos com a indicação dos polos elétricos (+ e -) a conectar e a parte anódica e catódica das soluções; b) Ensaio realizado às misturas de betão leve

8. Tal como ilustrado na figura 3.22, o esquema de ensaio é realizado dessa mesma maneira. Conecta-se o polo positivo na solução anódica e o polo negativo para a solução catódica
9. Foi utilizado uma tensão de 30V, no qual foi registado a intensidade da corrente inicial que passa pelo provete;
10. Caso seja necessário, efetua-se um ajuste da tensão registando a corrente inicial e a temperatura inicial em cada solução anódica;
11. Mediante cada registo da intensidade elétrica é definida com base na norma a duração do ensaio para cada mistura, no final do tempo de ensaio regista-se a intensidade da corrente final e a temperatura final;
12. Após a conclusão, desmonta-se e lava-se o provete com água da torneira;
13. Após a etapa anterior submete-se os provetes na prensa á compressão diametral, obtendo duas metades do provete;
14. Às partes obtidas borrifada-se com uma solução de AgNO_3 0,1M;
15. Após 20 minutos da borrifadela, começa a aparecer um precipitado branco de AgCl claramente visto (Figura 3.23). Mede-se a profundidade de penetração do lado ao centro (usando um paquímetro digital) até obter 7 profundidades e a distância de cada ponte deve ser de 10mm.
16. Por fim, o coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado por seguinte equação simplificada:

$$D = \frac{0,0239(273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad 3.8$$

Onde:

- D – O coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;
- U – O valor absoluto da voltagem aplicada, V;
- T – O valor médio das temperaturas inicial e final no anólito, °C;
- L – A espessura do provete, mm;
- x_d – O valor médio da profundidade de penetração, mm.

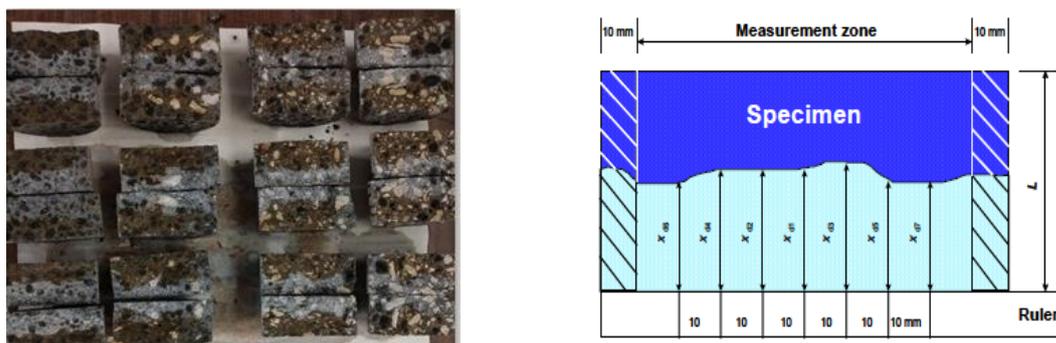
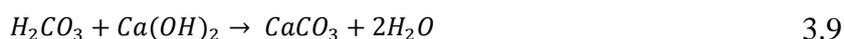


Figura 3.23 - a) Penetração nos provetes do ensaio de migração de cloretos em todas misturas do betão leve; b) Esquema de medição

3.2.10. Carbonatação

A penetração do CO_2 no betão é a causa de carbonatação. Os principais responsáveis pela despassivação das amaduras é o dióxido de carbono juntamente com os iões de cloro. Sendo assim, a carbonatação é um processo que se desenvolve ao longo do tempo, em que o dióxido de carbono (CO_2) presente num ambiente reage com a presença de humidade e com os minerais do cimento hidratado [65].

O CO_2 proveniente da atmosfera reage nomeadamente com o material hidratado, particularmente o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formando carbonato de cálcio (CaCO_3):



No âmbito geral, a carbonatação penetra para além da camada superficial muito lentamente, à medida que a humidade libertada da reação acima descrita, difunde-se para fora para preservar o equilíbrio da humidade entre a atmosfera e o interior do betão.

Quanto à durabilidade, o interesse da carbonatação reside objetivamente na redução do pH da água no betão endurecido, inicialmente partindo de valores de 12.6 a 13.5 para um valor inferior a 9.0 [65].

No processo da carbonatação, quando todo hidróxido de cálcio disponível no sistema estiver carbonatado, significa que o valor de pH está na ordem dos 8 na estrutura, assim, o aço quando se encontra no meio alcalino do betão, cria uma camada fina de óxido, conhecida como

camada de passivação, esta adere fortemente ao aço protegendo-o da reação com o oxigênio e a água.

Para que não ocorra dano na camada protetora é necessário que a água presente no betão tenha um pH elevado, caso contrário, o pH baixa devido à carbonatação, a camada protetora é eliminada e ocorre a corrosão.

O conhecimento da carbonatação no betão é importante, isto porque é necessário conhecer a profundidade da carbonatação.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 12390-12 [66], os provetes foram preparados com uma dimensão 100x100x425 mm³. A concentração de CO₂ na câmara é de 4±0.5%, e as profundidades de carbonatação dos betões no dia 56, 63 e 70 são medidas.

A reação de carbonatação ocorre primeiro na superfície do betão e, em seguida, desenvolve-se gradualmente para o interior com a difusão de CO₂ no betão. A pesquisa mostra que a relação entre a profundidade de carbonatação x e o tempo t é a seguinte:

$$x = k\sqrt{t} \quad 3.10$$

Em que:

- x – A profundidade de carbonatação, em mm;
- t – Tempo, em ano;
- k – Um coeficiente, apresenta a caracterização de betão, em mm/ano^{0.5}.

Processo de ensaio:

1. Previamente os provetes são mantidos numa cura de 28 dias a 20°C±2 e 90% Hr numa câmara húmida e posteriormente colocados no ambiente normal de laboratório durante 14 dias;
2. Duas faces dos provetes são revestidas com parafina, sem exposição do CO₂, deixando as outras duas faces expostas aos CO₂, os topos dos provetes devem ser também impermeabilizados com parafina para que não ocorra carbonatação nessas faces;
3. A câmara deve estar ajustada de acordo com as concentrações referidas na norma, concentração de CO₂ para 4±0.5%, temperatura de 20°C e uma Hr de 55%±5;
4. Após cada idade de ensaios (56, 63 e 70 dias) definidos na norma, retirar uma fatia do provete e pulverizar com uma solução de fenolftaleína. Após 30 min realizar a medição

da profundidade de carbonatação de cada lado de provete em 9 pontos, tal como indicado na figura 3.24;



Figura 3.24 - Medição da profundidade de carbonatação nos provetes

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Metodologia Faury

O betão é um material de construção misto composto de vários materiais. Devido aos seus materiais mistos, como água, cimento e agregados, diferentes dosagens têm diferentes impactos no desempenho do betão endurecido.

Além disso, o uso racional dos recursos hídricos, a redução de altas emissões de poluição do cimento e a prevenção de escavação e extração excessiva de recursos naturais são questões urgentes que enfrentamos na proteção da ecologia. Por esses motivos, devemos ser económicos e eficientes na determinação da quantidade de cada material em betão.

Neste estudo optou-se pelo método das curvas de referência de Faury, sendo este de natureza empírica e que visa sobretudo fornecer uma curva granulométrica das partículas sólidas do betão, este método apoia-se sobretudo na natureza dos agregados, na trabalhabilidade que se pretende, nos meios de colocação do betão na estrutura, o efeito de parede e a presença de armaduras, tendo em conta estes fatores, conduzem à maior compacidade do betão endurecido.

Especificamente, foi necessário determinar os seguintes parâmetros:

- (1) Granulometria e máxima dimensão do agregado;
- (2) Dosagem de cimento;
- (3) Relação de água/cimento;
- (4) Volume de vazios;
- (5) Compressão e trabalhabilidade.

4.1.1. Determinar a máxima dimensão do agregado

O tamanho máximo de partícula do agregado afeta não apenas o tamanho da partícula, mas também o desempenho de trabalhabilidade do betão fresco e as propriedades mecânicas do betão endurecido. Portanto, a determinação do tamanho máximo de partícula do agregado é uma tarefa muito importante para a granulometria do betão. No estudo do betão leve foi calculado o tamanho máximo de partícula do agregado de acordo com a seguinte equação:

$$D = d_1 + (d_1 - d_2) \times \frac{m}{n} \quad 4.1$$

Onde:

- D – Máxima dimensão do agregado, em mm;
- d_1 – A dimensão do primeiro peneiro onde fica material retido, em mm;
- d_2 – A dimensão da malha do peneiro imediatamente a seguir, em mm;
- m – Percentagem do peso das partículas no peneiro d_1 ;
- n - Percentagem do peso das partículas que passaram através de d_1 e ficam retidas em d_2 .

Na tabela 4.1 são mostrados os valores de $D_{m\acute{a}x.}$ dos diferentes agregados calculados.

Tabela 4.1 – Valores do $D_{m\acute{a}x.}$ dos agregados utilizados nas misturas de betão leve

Agregados	$D_{m\acute{a}x.}$ (mm)
Areia 0/4	4
Leca 2/10	10
Leca 10/20	20
RF	20

4.1.2. Dosagem de cimento

De acordo com a norma LNEC E378 [67], usa-se a tabela 4.2 e tabela 4.3 a para determinar a dosagem mínima de cimento para betão quando o tamanho da partícula do agregado é de 32 mm.

Tabela 4.2 – Dosagem de ligante, razões água/ligante e classes de resistência do betão, em função das classes de exposição ambiental [67]

Fatores de corrosão das armaduras	Carbonatação				Ação dos cloretos		
Classes de exposição ambiental	EC1	EC2	EC3	EC4	ECL1	ECL2	ECL3
Mínima dosagem de ligante, C32 (kg/m ³)	260	280	300	320	340	320	360
Máxima razão água/ligante	0.65	0.6	0.6	0.55	0.45	0.5	0.45
Classe de resistência mínima do betão	C20/25	C20/25	C25/30	C30/37	C32/40	C30/37	C35/45
Recobrimento mínimo da armadura (mm)	20	25	25	25	40	40	45

Tabela 4.3 - Dosagem de ligante, razões água/ligante e classes de resistência do betão, em função das classes de exposição ambiental [67]

Fatores de deterioração do betão	Acção de gelo-degelo		Acção de ambientes quimicamente agressivos		
	EG1	EG2	EQ1	EQ2	EQ3
Classes de exposição ambiental	EG1	EG2	EQ1	EQ2	EQ3
Mínima dosagem de ligante, C32 (kg/m ³)	300	340	340	360	380
Máxima razão água/ligante	0.5	0.45	0.45	0.45	0.4
Classe de resistência mínima do betão	C30/37	C32/40	C32/40	C35/45	C40/50

Quando o tamanho máximo de partícula do agregado grosso é inferior a 32mm, primeiro determina a quantidade mínima de cimento correspondente a 32mm e, em seguida, determina a dosagem de cimento de acordo com a seguinte fórmula:

$$C_D = \frac{2 \times C_{32}}{D^{0.2}} \quad 4.2$$

Em que:

- C_D – A quantidade mínima de cimento correspondente a D mm do agregado, kg/m³;
- D – Máxima dimensão do agregado, em mm;
- C_{32} - A quantidade mínima de cimento correspondente ao agregado de 32mm, kg/m³.

Também tem uma fórmula empírica seguinte:

$$C_{aconselhado} = \frac{20 \times (f_{cx} + 10)}{D^{0.2}} \quad 4.3$$

Em que:

- f_{cx} – Tensão característica.

Para a determinação do cimento das misturas de betão leve optou-se por calcular com a Equação 4.2, obtendo-se uma quantidade cimento de 350 kg/m³.

4.1.3. Determinar a relação A/C

Consultou-se também a tabela 4.2 e a tabela 4.3 para determinar claramente a relação A/C do betão. Claro, depois de determinar a quantidade de cimento em 4.1.2, pode usar uma fórmula empírica para determinar a quantidade de água e, finalmente, A/C pode ser obtido.

$$\text{Água} = 165 + 0,2 \times (C - 300) \quad 4.4$$

Em que o C – é a quantidade de cimento, em kg/m³.

Para o estudo em causa foi adotada uma razão de A/L de 0,30.

4.1.4. Efeito de Parede

Efeito de parede, ou seja, as partículas finas devem-se concentrar na superfície do betão ou molde, para que a qualidade interna de betão não se deteriore. De facto, o efeito de parede afetará a compactação, pois a quantidade de argamassa necessária para o espaço entre o agregado grosso e a superfície da parede é maior do que a quantidade de argamassa no interior do material.

Pode-se observar que o principal fator que afeta o efeito de parede é a relação de volume entre o agregado grosso e o agregado fino, portanto, a seguinte fórmula é utilizada para caracterizar o efeito de parede:

$$\frac{R}{D} = \frac{\text{raio médio do molde}}{\text{máxima dimensão do agregado no betão}} \quad 4.5$$

Em que:

- $R = \frac{\text{volume a encher de betão}}{\text{área total da parede e das armaduras em contacto com o betão}}$

Em que: O volume não é de toda a peça, mas apenas das partes mais armadas, por exemplo fundo das vigas, nós das armaduras etc. (se tem armadura na área, tem que menor o volume de armadura);

- D – A máxima dimensão do agregado no betão, em mm.

Esta fórmula mostra que à medida que a relação R/D aumenta, isso significa que a quantidade de agregado grosso também cresce. No método de Faury, a máxima dimensão de agregado é definida como segue:

$$D \leq \frac{4}{3}R \quad 4.6$$

Se no molde cúbico, de aresta L,

$$R = \frac{L}{6} \quad 4.7$$

4.1.5. Fixar o valor A e B

Os valores de A e B são utilizados principalmente para levar em consideração a trabalhabilidade e compactação do betão (A corresponde à trabalhabilidade, o B corresponde à compactação) durante a fase de projeto da composição do betão, de modo a otimizar e formular o betão com o desempenho necessário ao máximo.

Na tabela 4.4 mostra como se escolhe os valores de A e B.

Tabela 4.4 – Os valores dos parâmetros A e B da curva de Faury

Valores dos parâmetros A e B da curva de Faury					
Trabalhabilidade de *	Meios de compactação que se podem empregar	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos inertes			
		Areia rolada		Areia britada	
		Inerte grosso rolado	Inerte grosso britado	Inerte grosso britado	
Terra húmida	Vibração muito potente e possível compressão (pré-fabricação)	≤18	≤19	≤20	1
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluída	Espalhamento e compactação pelo próprio peso	32	34	38	2
* Para a definição da trabalhabilidade ver o quadro seguinte					
Classificação da trabalhabilidade e indicação dos meios de compactação correspondentes					
Trabalhabilidade	Meios de compactação que se podem empregar	Métodos de medição da trabalhabilidade			
		Graus Vêbê	Abaixamento do cone de Abrams, cm		
Terra húmida	Vibração potente e compressão (pré-fabricação)	>30	-		
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	30 a 10	-		
Plástica	Vibração normal	10 a 2	0 a 4		
Mole	Apiloamento	-	4 a 15		
Fluída	Espalhamento e compactação pelo próprio peso	-	>15		

Os valores adotados no nosso estudo do betão leve corresponderam ao valor de A=28 e para o valor de B=2

4.1.6. Determinar $Y_{D/2}$

$$Y_{\frac{D}{2}} = A + 17 \times D^{0,2} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad 4.8$$

- $Y_{D/2}$ – Na curva Faury, a abscissa $D/2$ corresponde ao valor da ordenada, em %;
- A - O valor de A, na Tabela 4.4, corresponde à trabalhabilidade de betão;
- B - O valor de B, na Tabela 4.4, corresponde à compactação de betão.

4.1.7. Fórmula básica da composição do betão

Para a preparação de 1 m³ de betão, pode-se considerar a composição de agregados da cada classe, água, cimento e vazios por unidade de volume. Disto podemos obter uma fórmula:

$$\sum \frac{M_i}{\rho_i} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{A}{\rho_A} + V_v = 1 \quad 4.9$$

Em que:

- M_i - Massa do agregado da classe i, em kg por m³ de betão;
- ρ_i – Massa volúmica do agregado, em kg/m³;
- C - Massa do cimento, em kg por m³ de betão;
- ρ_c – Massa volúmica do cimento, em kg/m³;
- A – Massa da água, em L por m³ de betão;
- ρ_A – Massa volúmica da água utilizado, em kg/m³;
- V_v – Volume de vazios, em m³ por m³ de betão.

Nesta equação, tem o parâmetro do volume de vazios que o significa espaço entre os materiais utilizados (os agregados, as partículas de cimentos etc.), mas não inclui os vazios do próprio material. O volume de vazios de betão tem a relação com a máxima dimensão de agregado, de acordo com a norma ACI 613, na tabela 4.5 mostra-se o volume de vazios do betão compactado.

Tabela 4.5 – O volume de vazios do betão compactado

Máxima dimensão do agregado (mm)	9,5	12,7	19,1	25,4	38,1	50,8	76,2	152,4
Volume de vazio - V_v (m ³ /m ³)	0,03	0,025	0,02	0,015	0,01	0,005	0,003	0,002

4.1.8. Determinar a percentagem de cimento

Quando se calcula a percentagem de cimento, considera-se o volume de cimento e agregado, referenciando a equação 4-9, pode-se seguinte a equação:

$$P_c = \frac{c}{c + m} = \frac{\left(\frac{C}{\rho_c}\right)}{\left(\frac{C}{\rho_c} + \sum \frac{M_i}{\rho_i}\right)} \quad 4.10$$

Em que:

- P_c – A percentagem de cimento, em %;
- c – O volume de cimento por m^3 de betão, em m^3 ;
- m - O volume de agregados por m^3 de betão, em m^3 .

4.1.9. Curva de Faury

No final de todos os cálculos auxiliares para o método de Faury, apresentou-se uma curva de Faury de betão leve de referência na figura 4.1.

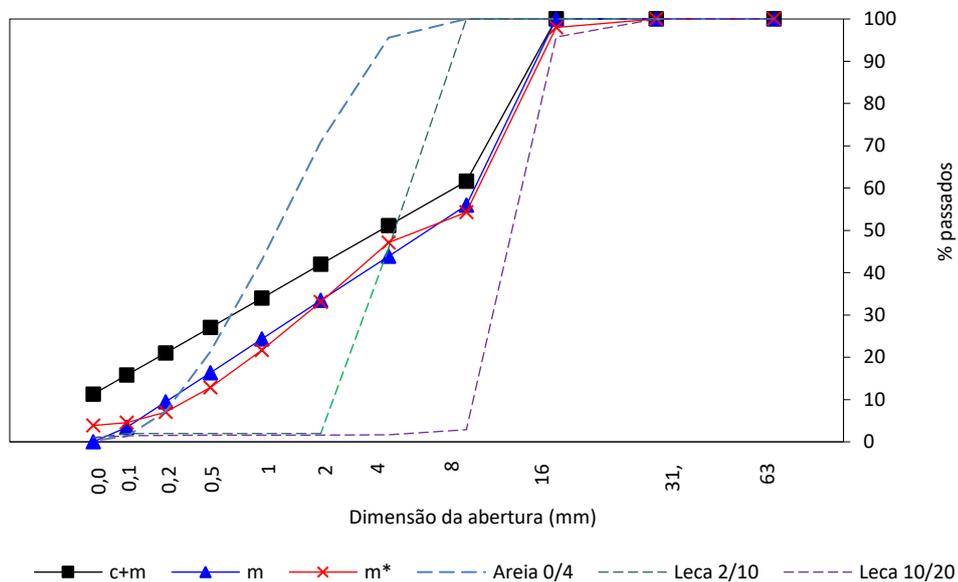


Figura 4.1 - Apresentação da curva de Faury para o estudo do betão leve de referência

4.2. Quantidade da substituição de RF

Após determinar a composição do betão de referência pelo método de Faury, procedeu-se com as devidas percentagens de substituição, nomeadamente, 30,60,80 % de RF e calculou-se as quantidades pelas seguintes equações:

Antes de calcular, definindo que a quantidade de RF é o 'x', a quantidade de Leca 2-10 é o 'y', a quantidade de Leca 10-20 é o 'z' e a taxa de substituição é 'k'.

$$\begin{cases} z = 5,25y \\ x = k \cdot (x + y + z) \\ \frac{M_c}{\rho_c} + \frac{M_{AR}}{\rho_{AR}} + \frac{M_a}{\rho_a} + \frac{M_{SP}}{\rho_{SP}} + \frac{x}{\rho_x} + \frac{y}{\rho_y} + \frac{z}{\rho_z} + V_v = 1 \end{cases} \quad 4.11$$

Em que:

- M_c – Quantidade da dosagem de cimento por m^3 de betão leve, em kg;
- M_{AR} – Quantidade da dosagem de areia do rio por m^3 de betão leve, em kg;
- M_a – Quantidade da dosagem de água por m^3 de betão leve, em kg;
- M_{SP} – Quantidade da dosagem de SP por m^3 de betão leve, em kg;
- ρ_c – Densidade de cimento, em kg/m^3 ;
- ρ_{AR} – Densidade de areia do rio, em kg/m^3 ;
- ρ_a – Densidade de água, em kg/m^3 ;
- ρ_{SP} – Densidade de SP, em kg/m^3 ;
- ρ_x – Densidade de RF, em kg/m^3 ;
- ρ_y – Densidade de Leca 2-10, em kg/m^3 ;
- ρ_z – Densidade de Leca 10-20, em kg/m^3 ;
- V_v – Volume de vazios, em m^3 por m^3 de betão.

Após o cálculo acima mencionado, foi resumida as quantidades para a cada tipo de mistura, como podemos observar na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - As composições de betões leves (kg/m^3)

Mistura	Quantidade de material por 1 m^3							
	Cimento	Areia 0/4	Água	A/C	Argila expandida		RF	SP
					2/10	10/20		
M0					76	398	0	3.5
M1	350	346	101	0.3	69	361	184	3.5
M2					52	274	490	5.1
M3					34	176	838	12.3

No estudo, foram feitas as amostras num ambiente de laboratório com uma temperatura 20°C. Numa primeira fase preparou-se um betão leve de referência, no qual posteriormente foi substituído nesse betão 30%, 60% e 80% do agregado leve por resíduo de fundição (RF).

Foram preparados diversos provetes para os diferentes ensaios realizados no estudo do betão leve, nomeadamente ensaio de caracterização mecânica e de durabilidade, como o tipo de provetes e a quantidade por ensaio, tal como indicado na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – A quantidade do provete por cada tipo de betão leve

Tipo de ensaios	Cubos (150*150*150)	Cubos (100*100*100)	Vigas (100*100*850)	Cilindros (H200, D100)
Resistência à compressão	3	-	-	-
Resistência à flexão	-	-	2	-
Absorção por imersão	-	3	-	-
Absorção por capilaridade	-	3	-	-
Módulo de elasticidade	-	-	-	5
Carbonatação	-	-	1	-
Resistividade	1	-	-	-
Ultrassons	1	-	-	-
CTH	-	-	-	1
Totais provetes(unidade)	5	6	3	6

4.3. Resultados de ensaios

4.3.1. Densidade

Na tabela 4.8, observa-se que, à medida que se aumenta substituição a quantidade de RF no betão leve, também a densidade vai aumentando gradualmente, tal como era esperado.

Para a mistura com substituição de 80% de RF a densidade obtida está próxima do valor limite especificado para os betões leves, obtendo especificamente um valor de 1998,74 kg/m³, o que implica neste estudo só ser possível no máximo substituir 80% de RF no betão leve.

Tabela 4.8 – As densidades de betão leve (kg/m³)

Provetes	M0	M1	M2	M3
Densidades	1541,73	1584,69	1881,09	1998,74

4.3.2. Abaixamento e quantidade de superplastificante

No processo de preparação do betão leve, foi usado um SP (MasterGlenium SKY 617 - BASF) para ajustar a trabalhabilidade (abaixamento) do betão leve. Neste processo foi adicionado percentagens de SP entre 1% -5% em função da quantidade de cimento.

Paras as misturas M3 e M4, foi necessário aumentar a quantidade de SP. Este aumento deveu-se relativamente também ao aumento do RF no betão leve, tornando o betão com propriedades

de fluidez baixos e fora da classe S3, nesse sentido foi necessário aumentar os valores de SP para obter os abaixamentos indicados na figura 4.2.

Após a realização do abaixamento do betão fresco de acordo com a norma NP EN 206-1 [3], obteve-se por fim os resultados de abaixamento na figura 4.2 e figura 4.3.

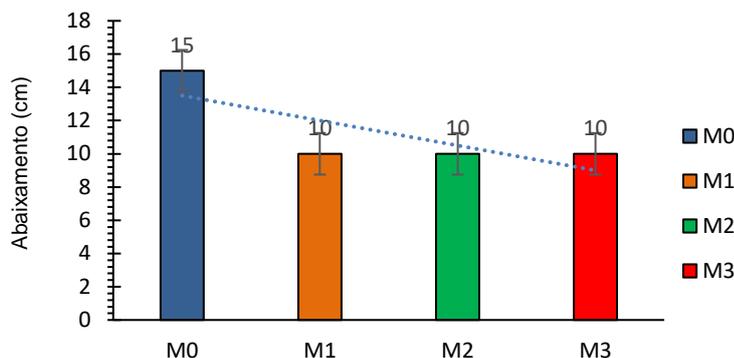


Figura 4.2 - Os abaixamentos de betões leves frescos

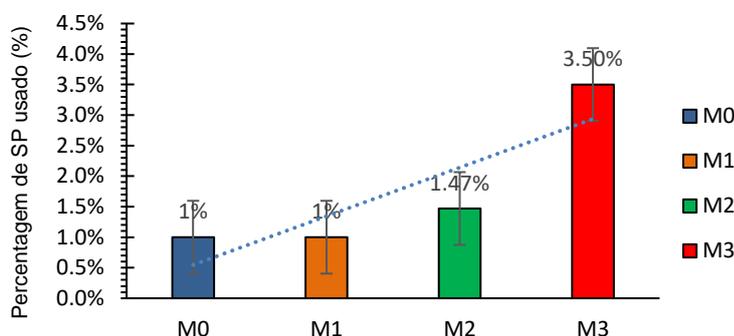


Figura 4.3 - Percentagem de SP usado por cimento

De acordo com a norma NP EN 206-1 [3], os 4 tipos de betão leve fresco obtiveram abaixamento S3, tal como observado na figura 4.2. Na figura 4.3 também se destacou que á medida que a quantidade de RF aumentava nas misturas, se notava que o aumento da utilização de SP era necessário para atingir a mesmo abaixamento que a outras misturas com classe S3. Em particular, a quantidade de SP de M3 é 3,5 vezes mais do que M1.

Comparando os dois tipos de agregados, RF e AE, verificamos que a principal razão se deve á forma e ao tamanho do agregado, com uma ligeira diferença de granulometrias entre os dois materiais. A característica física usual da AE comercial são no geral uma forma redonda, com

uma superfície relativamente lisa e limpa, o que reduz o atrito entre os agregados. O RF é uma forma irregular com pequenas partículas soltas na superfície do agregado, o que aumenta o atrito entre os agregados.

4.3.3. Absorção por imersão

O ensaio de absorção por imersão foi realizado de acordo com as normas NP EN 12390-7 [57] e LNEC E 394 [68]. A fim de garantir resultados com um desvio padrão baixo, foram ensaiados 3 provetes para cada tipo de betão leve. Todos os coeficientes de variação de absorção por imersão de cada tipo de betão leve são apresentados na tabela 4.9, no entanto podemos ver a sua variação graficamente na figura 4.4.

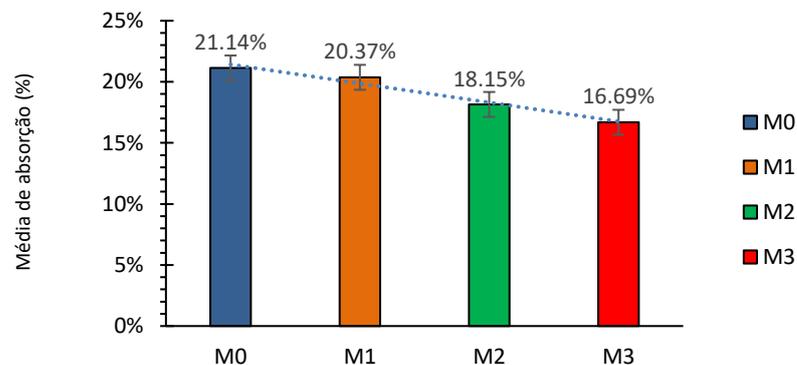


Figura 4.4 - A média de absorção por imersão

Observando a partir da figura 4.4 à medida que o conteúdo de RF aumenta, a taxa de absorção por imersão do betão leve endurecido diminui. Essa mudança está relacionada à absorção por imersão de RF e seu conteúdo no betão leve.

Tabela 4.9 – O coeficiente de variação da absorção por imersão

Mistura	Absorção média (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
M0	21.14%	0.29%	1.38%
M1	20.37%	0.20%	1.00%
M2	18.15%	0.16%	0.86%
M3	16.69%	0.24%	1.44%

Os resultados neste estudo da absorção por imersão demonstram que a medida que se substitui a AE por RF a porosidade tem uma tendência de diminuição. Este facto deve-se à própria natureza do RF que proporciona misturas mais compactas.

4.3.4. Absorção por capilaridade

De acordo com a norma LNEC E 393 [58], para o ensaio de absorção de água por capilaridade foram utilizados provetes cúbicos (três provetes para cada tipo de betão leve) com dimensões de $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ e com 28 dias de idade.

O ensaio de absorção de água por capilaridade, teve uma duração de 340 horas, este tempo de duração deveu-se à verificação do seu comportamento ao longo do tempo e não necessariamente só calcular o coeficiente absorção de água por capilaridade.

Observando a figura 4.5, existem ligeiras diferenças nas mudanças das quatro curvas devido à composição de cada mistura relativamente à substituição do RF. Nota-se no início do ensaio uma rápida absorção capilar no geral em todas as misturas, no entanto essa rápida absorção capilar vai se atenuando nas misturas com maior percentagem de RF ao longo do tempo.

Nas misturas M0 e M1 existe um volume de poros interligados no betão quando comparados com as misturas M2, M3, mais uma vez devido ao aumento da substituição da AE pelo RF, e é notável no desempenho das curvas de absorção capilar, como se observa na figura 4.5.

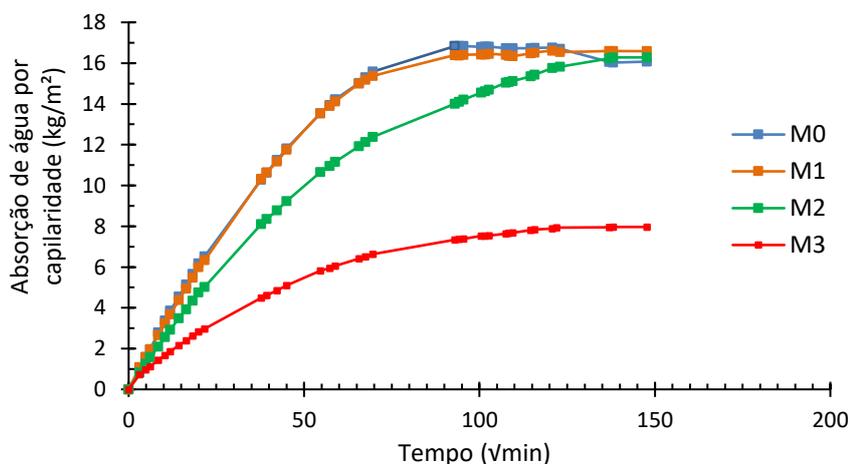


Figura 4.5 - Curva de absorção de água por capilaridade

Na figura 4.6, o coeficiente de absorção por capilaridade ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-0.5}$) pode ser representado pela inclinação da linha reta (ou seja, o grau de inclinação da linha reta).

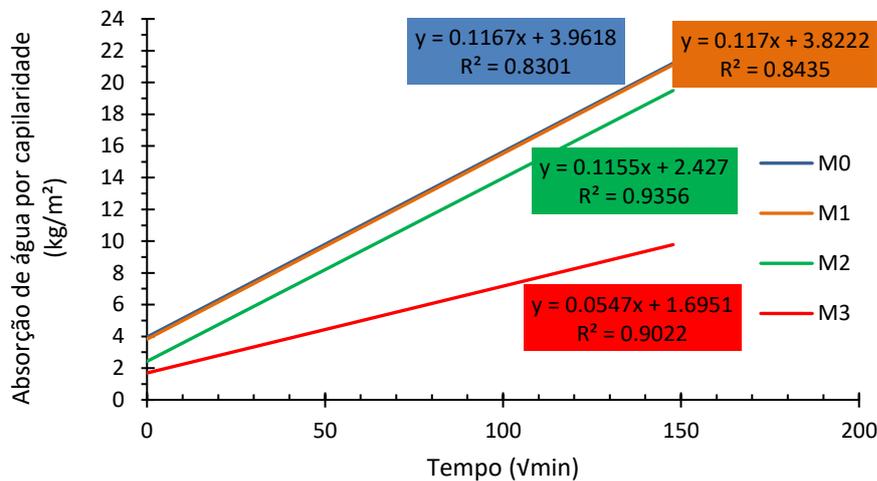


Figura 4.6.– Linha de absorção por capilaridade

As duas retas M0 e M1 basicamente coincidem, indicando que existem coeficientes de absorção por capilaridade semelhantes. Com o aumento da quantidade de RF, o coeficiente de absorção por capilaridade do betão diminui, no caso da M2 e M3 (ou seja, aumentou-se a quantidade de RF nessas misturas). A incorporação de RF resultou em betões mais compactos.

4.3.5. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com norma de NP EN 12390-3 [59]. Para cada tipo de betão leve foram ensaiados três provetes com uma cura de 28 dias, calculando-se a média desses valores.

Por fim, obteve-se os resultados de resistência à compressão dos betões leves representados figura 4.7. Observando a figura 4.7 podemos afirmar que existe uma tendência para os valores de resistência, assim como os valores de densidade aumentarem à medida que se aumenta a substituição por resíduo de fundição (RF).

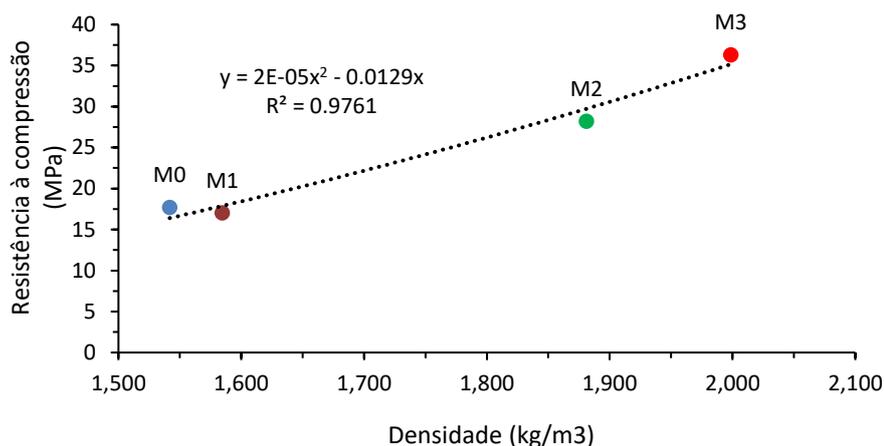


Figura 4.7.– Os resultados de resistência à compressão (MPa)

Na figura 4.7 podemos observar o aumento de resistência quando se aumenta a percentagem da quantidade de RF.

Nas misturas M0, M1, M2 na figura 4.7, podemos concluir que tem propriedades de densidade de características de um betão leve (valores entre 1400 – 2000 kg/m³), assim como em relação à sua resistência mecânica (valores médios acima de 15 MPa), para betões leves estruturais. No entanto a mistura M3 já apresenta um valor de densidade bastante elevado e um valor de resistência superiores às restantes, fato este que se deve á grande quantidade de substituição do material de AE por RF.

No geral podemos afirmar que estes betões leves estudados apresentam características mecânicas num intervalo de 17 a 36 MPa, como podemos observar na tabela 4.10 tal como já referido acima, cumprindo os requisitos de um betão leve para uso estrutural.

Tabela 4.10 – Características de resistência à compressão e densidade dos betões leves do estudo

Misturas	Densidade (kg/m3)	Resistência à compressão (MPa)
M0	1541.73	17.7
M1	1584.69	17
M2	1881.09	28.2
M3	1998.74	36.3

4.3.6. Resistência à flexão

Os valores médios de resistência à flexão foram ensaiados de acordo com a norma NP EN 12390-5 [60]. Tal como foi verificado na resistência à compressão o aumento da resistência à medida que se aumenta a percentagem de RF nas misturas, também na resistência à flexão foi demonstrado tal e qual a mesma tendência de valores, como podemos observar na figura 4.8.

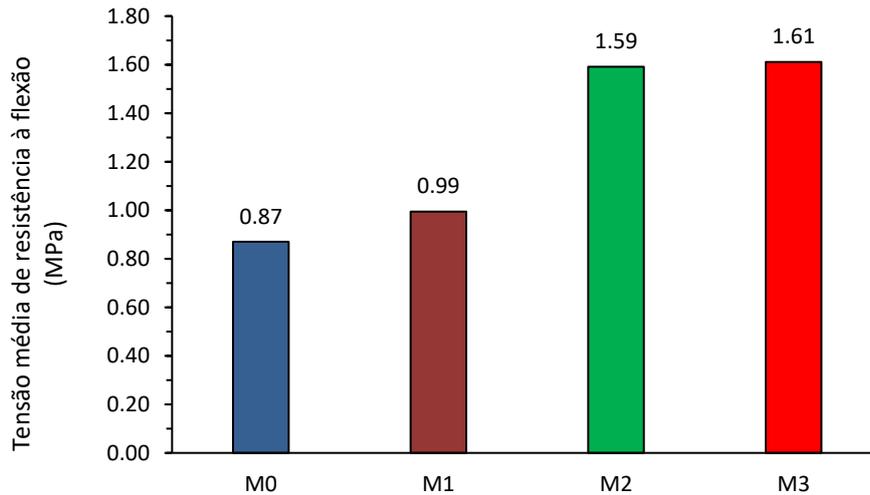


Figura 4.8.– Tensão média de resistência à flexão (MPa) do estudo de betão leve com RF

Pode-se observar na figura 4.8 que conforme a quantidade de RF aumenta, a resistência à flexão dos provetes aumenta. Isso prova que a incorporação de RF pode aumentar a resistência à flexão do betão leve endurecido e, à medida que a quantidade aumenta, sua contribuição para a resistência à flexão se torna mais forte.

Tabela 4.11 – Características de resistência à flexão

Mistura	Tensão média de resistência à flexão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
M0	0.87	0.018	2.1%
M1	0.99	0.075	7.5%
M2	1.59	0.064	4.0%
M3	1.61	0.044	2.7%

Pode-se afirmar que a partir dos valores obtidos na tabela 4.11 que a tendência do aumento da quantidade de RF de 60% (M2), tem uma contribuição para a resistência à flexão do betão leve a melhor eficiência.

4.3.7. Módulo de Elasticidade

De acordo a norma NP EN 12390-13 [61], foram preparados cinco provetes cilíndricos para cada tipo de mistura de betão, um dos quais foi utilizado para determinar o $f_c/3$, os restantes foram utilizados para determinar o módulo de elasticidade.

Tabela 4.12 – Resistência de compressão dos provetes cilíndricos (F_c)

Amostra	F_c - (kN)	$f_c/3$ (kN)
M0A	84,2	28
M1A	129,9	43,3
M2A	211,4	70,3
M3A	223,8	74,6

Para cada ensaio do módulo de elasticidade foram realizados 3 ciclos de carga e descarga, de acordo com a norma e para o método B, como se observa na figura 3.14.

Na figura 4.9 é exemplificado para um dos provetes de uma determinada mistura a realização dos ensaios dos módulos de elasticidade, no qual são apresentados os resultados graficamente dos ciclos efetuados, assim como os gráficos dos módulos de elasticidade para cada sensor de deslocamento.

Após os 3 ciclos de carga e descarga para a tensão e extensão efetuados foram calculados graficamente os módulos de elasticidade e verificados de acordo com a norma para cada provete de cada mistura.

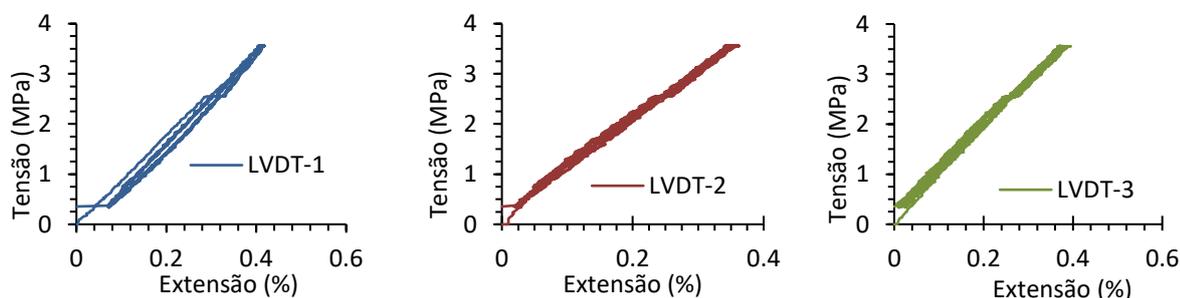


Figura 4.9.– Resultados graficamente obtidos dos ciclos carga e descarga efetuados para a obtenção dos módulos de elasticidade (E)

Na figura 4.10 é mostrado um exemplo do módulo calculado graficamente para um dos provetes de uma determinada mistura.

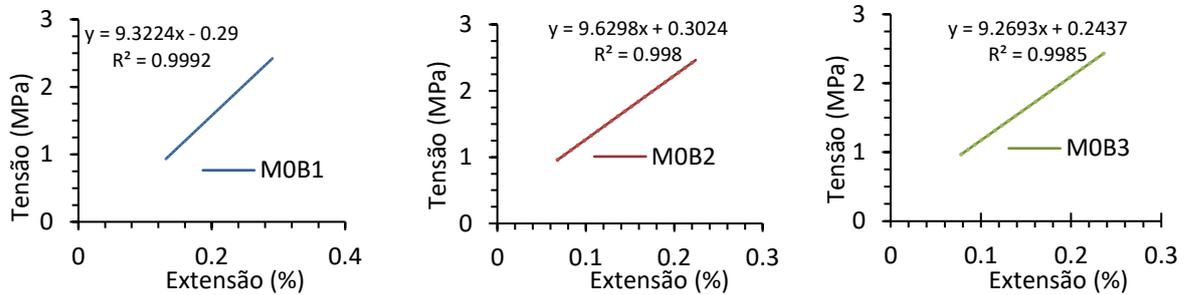


Figura 4.10.– Resultados graficamente obtidos da mistura de REF de três provetes para os módulos elasticidade (E)

Após todos ensaios realizados para os módulos de elasticidade de todas as misturas foram todos resumidos, tal como observado na figura 4.11.

Tal como já foi evidenciado, o módulo de elasticidade do betão depende da rigidez da estrutura interna do material, que está diretamente relacionada com a porosidade do material [69] e [70].

Observa-se que existe uma tendência de aumento tendencial dos valores do módulo de elasticidade á medida que se realizou a incorporação do material de substituição, devendo esta tendência a justificação acima referenciada.

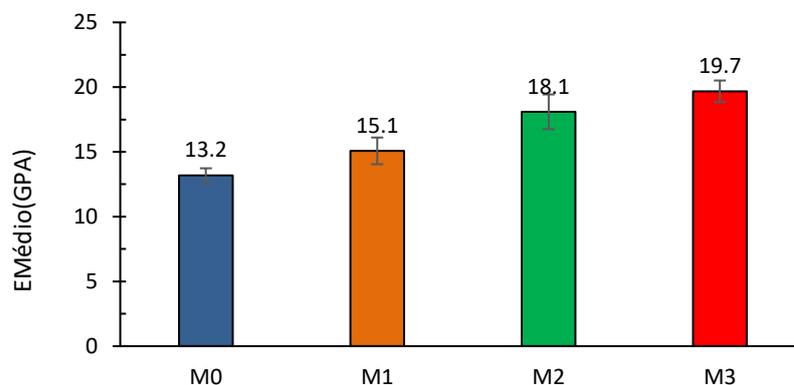


Figura 4.11.– Valores dos módulos de elasticidades para as misturas estudadas

Podemos afirmar que os valores obtidos do módulo de elasticidades para este tipo de betões leves e tipo de densidades, que são valores que se enquadram neste tipo de betões e com valores normais, tal como podemos observar na literatura anteriormente, quando comparados com os nossos resultados.

4.3.8. Resistividade

De acordo com a norma LMC-PE-002 [62], o ensaio de resistividade foi realizado e obtendo os valores médios de resistividade, na tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Os valores de resistividade ($k\Omega\text{cm}$)

Ensaio.	M0	M1	M2	M3
Média da resistividade ($k\Omega\text{cm}$)	3,7	5,9	6,8	8,1

É mostrado na tabela 4.14 e na tabela 4.15 a avaliação da probabilidade de corrosão e indicação da taxa de corrosão

Tabela 4.14 – O nível de estimação da probabilidade de corrosão

Valor de teste ($k\Omega\text{cm}$)	Nível
≥ 12	A corrosão é improvável
8 a 12	A corrosão é possível
≤ 8	A corrosão é bastante provável

Tabela 4.15 – O nível de indicação da taxa de corrosão

Valor de teste ($k\Omega\text{cm}$)	Nível
> 20	Taxa de corrosão baixa
10 a 20	Taxa de corrosão de baixa a moderada
5 a 10	Taxa de corrosão alta
< 5	Taxa de corrosão muito alta

Pode-se observar na tabela 4.13 e na tabela 4.14 que somente quando a quantidade de RF é de 80%, o valor de resistividade é 8,1, e a estimação da probabilidade de corrosão do betão é possível. Sempre que a quantidade de RF é inferior a 80%, a estimação da probabilidade de

corrosão do betão está em bastante provável. Especialmente quando M0, o valor de resistividade é 3,7 e a estimação da probabilidade de corrosão é o maior entre os quatro tipos.

Nas tabela 4.13 e tabela 4.15, O valor de resistividade de M0 é 3,9, então sua taxa de corrosão está no estado muito alta. As resistividades dos betões misturados com RF são maiores que 5, portanto estão em um estado de taxa alta. Ao mesmo tempo, também pode observar que à medida que a quantidade de RF aumenta, a taxa de corrosão é relativamente reduzida.

4.3.9. Ultrassons

De acordo com a NP EN 12504 – 4 [63], conduziu-se o ensaio ultrassónico nos provetes e obteve-se a velocidade da onda ultrassónica e os valores de tempo de diferentes provetes, conforme mostrado na tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Os resultados do ensaio ultrassônico

Misturas	Media tempo (μ s)	Distância (mm)	Velocidade (m/s)
M0	43.8	300	6849.3
M1	46.5	300	6451.6
M2	48.2	300	6224.1
M3	50.2	300	5976.1

Conforme o aumento da quantidade de RF, a velocidade de transmissão ultrassónica diminui, o que indica que o betão está mais denso.

4.3.10. Migração de cloretos por migração em regime não estacionário - CTH

De acordo com a norma LNEC E 463 [64], o ensaio CTH foi realizado. As profundidades médias de penetração de iões cloreto dos provetes foram testados e, os coeficientes de difusões no estado não estacionário foram calculados, mostrando na figura 4.12.

Observando-se na figura 4.12, com o aumento da quantidade de RF, a taxa de migração dos iões cloreto diminui. De zero de RF a 30% de quantidade, a taxa de migração de iões cloreto diminui obviamente. Portanto, a incorporação do agregado RF substitui o AE e reduz a porosidade, diminuindo o assim a migração de iões cloreto. Também está provado deste aspeto que a durabilidade do betão leve com agregado RF é melhor do que a do betão leve M0.

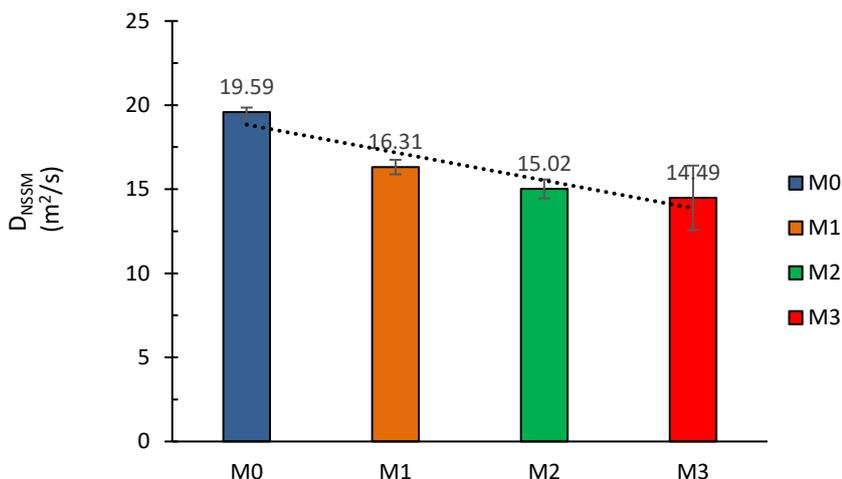


Figura 4.12.– O coeficiente de difusão no estado não estacionário dos provetes

4.3.11. Carbonatação

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 12390-12 [66], a profundidade média de carbonatação do provete nos 56, 63 e 70 dias é registada, conforme mostrado na figura 4.13.

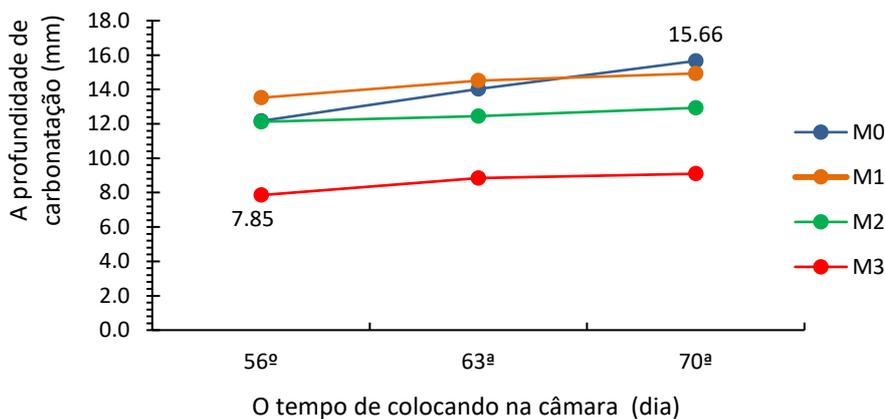


Figura 4.13.– Evolução profunda da carbonatação

Na figura 4.13, pode-se observar que a profundidade de carbonatação do betão leve sem RF muda muito com o tempo. Quando o betão leve misturado com RF, a linha de profundidade de carbonatação com o tempo é basicamente paralela, e a profundidade de carbonatação torna-se mais rasa com o aumento da quantidade de RF.

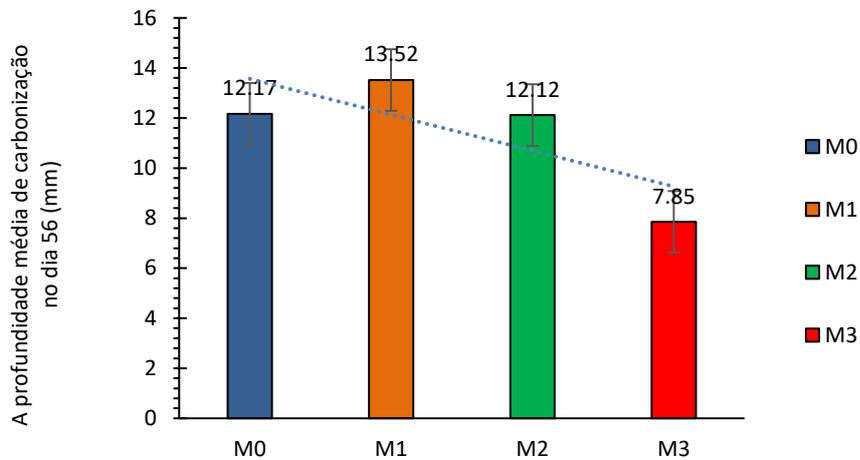


Figura 4.14.– A profundidade média de carbonatação no dia 56 (mm)

Na figura 4.14, no dia 56, o provete M1 tem a profundidade de carbonatação mais profunda. A profundidade de carbonatação dos provetes M0 e M2 são basicamente a mesma, e a profundidade de carbonatação de M3 é a mais baixa.

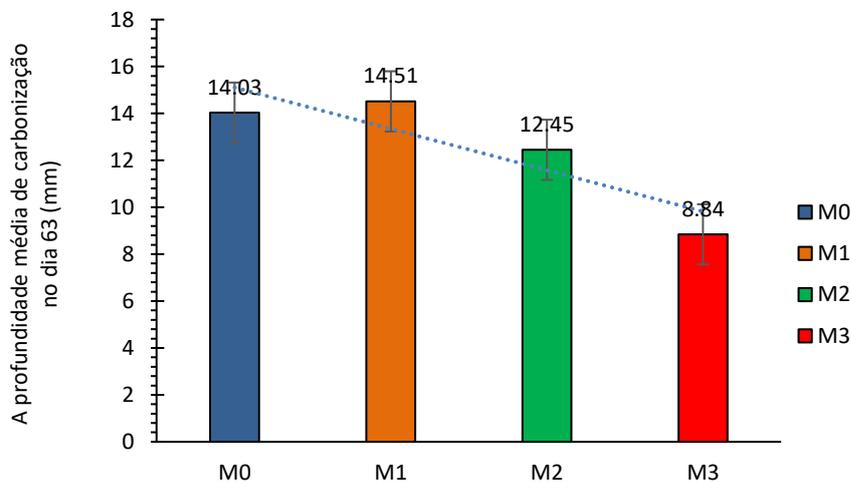


Figura 4.15.– A profundidade média de carbonatação no dia 63 (mm)

Na figura 4.15, no dia 63, as profundidades de carbonatação de todos os provetes aumentaram, especialmente, a profundidade de carbonatação do provete M0 mudou-se um pouco, ficando abaixo de M1. As taxas de crescimento da carbonatação de M1, M2 e M3 é basicamente a mesma.

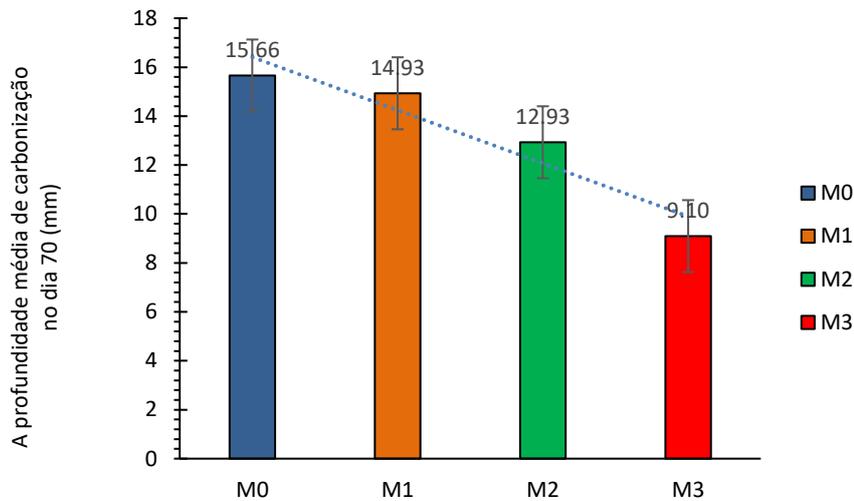


Figura 4.16.– A profundidade média de carbonatação no dia 70 (mm)

Na figura 4.16, no dia 70, as profundidades de carbonatação de M1, M2 e M3 continuam a manter basicamente a mesma taxa de crescimento, especialmente a profundidade de carbonatação de M3 ainda é a menor. A profundidade de carbonatação de M0 excedeu M1. A razão para o aumento da profundidade de carbonatação na fase posterior de M0 é também a porosidade do AE, pois assim que o CO_2 entrar no betão, haverá uma taxa de carbonatação mais rápida. O RF relativamente denso inibirá a rápida difusão de CO_2 até certo ponto.

No fim, o betão leve com grande quantidade de RF tem melhor desempenho na resistência à carbonatação do que o betão leve com AE. No entanto, o betão leve com 30% de quantidade de RF não apresentou melhor desempenho no estágio inicial de carbonatação e foi significativamente melhor do que o betão leve sem RF no processo posterior de carbonatação. Em termos de desempenho de carbonatação de betão leve com RF 60%, verifica-se que a profundidade de carbonatação diminui com o aumento da quantidade de RF.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS A DESENVOLVER

5.1. Conclusão

No processo de industrialização, os resíduos sólidos trouxeram grandes prejuízos ao meio ambiente ecológico, ao mesmo tempo que o desenvolvimento do moderno sector de construção aumentou a demanda por betão ano a ano. Neste contexto, levamos em consideração o desenvolvimento ambiental e económico, aplicamos os resíduos sólidos excedentes industriais como matéria-prima para agregados de betão, preparamos o betão leve necessário em projetos reais e realizamos o reaproveitamento de resíduos e uma cooperação amigável entre as duas indústrias.

Neste estudo, os RF são utilizados como objeto de estudo. Primeiro, caracterizamos as propriedades básicas do material, determinamos sua composição química e propriedades físicas (densidade, absorção de água e gradação original). Em seguida, usou-se a quantidade de 30%, 60% e 80% de RF para substituir parcialmente os agregados leves de AE e adicionou-se no betão leve. Finalmente, conduzimos ensaios comparativos sobre as propriedades mecânicas e durabilidade de todos os provetes de betão leve e tiramos as seguintes conclusões: (1) A quantidade de RF tem grande influência no desempenho de trabalhabilidade do betão leve. Quando a relação água-cimento é a mesma, para atingir o nível de abaixamento 10, o SP necessário para o betão leve com quantidade de RF 80% é 3,5 vezes da quantidade com RF de 30%. (2) Quando a quantidade de RF aumenta, a densidade do betão leve aumenta, assim como a resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade, e as propriedades mecânicas do betão leve são melhores. (3) Em termos de durabilidade, com a elevação da quantidade de RF, a absorção de água por capilaridade, a absorção de água por imersão e o coeficiente de difusão no estado não estacionário reduzem, e a probabilidade de corrosão e a taxa de corrosão do betão leve diminuem em relação ao betão leve de referência.

Em suma, com o aumento da quantidade de RF, as propriedades mecânicas e durabilidade do betão leve são relativamente melhoradas. Este estudo mostra que 80% da RF pode ser utilizada em betão leve, o que atingiu o objetivo inicial da pesquisa de RF utilizado no betão leve.

5.2. Trabalhos futuros a desenvolver

O desenvolvimento da indústria promoveu o progresso da sociedade. Com o desenvolvimento da indústria, a produção de gases residuais, águas residuais e resíduos sólidos tem um impacto irreversível no meio ambiente. Portanto, métodos razoáveis para tratar os três tipos de resíduos industriais tornaram-se uma importante questão para resolver a poluição ambiental e danos ecológicos. Nesta pesquisa, buscamos aplicar os resíduos de moldes cerâmicos de fundição para obter um betão leve com excelentes propriedades mecânicas comparando o betão leve de referência. Portanto, pode-se considerar os seguintes trabalhos futuros:

- (1) Usar outros resíduos sólidos industriais ou resíduos de construção e demolição para aplicar o mesmo método ao betão leve, ou aplicá-los a diferentes tipos de betão de acordo com as propriedades dos resíduos sólidos;
- (2) Usar resíduos de fundição para substituir as partículas finas, como a areia do rio;
- (3) Configurar equipamentos de peneiramento de agregados perto da fundição, e os agregados processados podem ser comercializados diretamente ou usados na obra.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Bejan, M. Barbua, R. S. Vizitiu, and A. Burlacu, “Lightweight concrete with waste - Review,” *Procedia Manuf.*, vol. 46, pp. 136–143, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.03.021.
- [2] Y. Guney, Y. D. Sari, M. Yalcin, A. Tuncan, and S. Donmez, “Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 8–9, pp. 1705–1713, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.02.018.
- [3] NP EN 206-1, “Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade,” *Concrete*, 2007.
- [4] J. Lourenço, E. Júlio, and P. Maranhã, “Expanded clay lightweight aggregate concrete (in portuguese),” pp. 1–8, 2004.
- [5] E. Q. R. Santiago, P. R. L. Lima, M. B. Leite, and R. D. Toledo Filho, “Mechanical behavior of recycled lightweight concrete using EVA waste and CDW under moderate temperature,” *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 2, no. 3, pp. 211–221, 2009, doi: 10.1590/s1983-41952009000300001.
- [6] A. Sales, F. R. De Souza, W. N. Dos Santos, A. M. Zimer, and F. D. C. R. Almeida, “Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 12, pp. 2446–2453, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.012.
- [7] J. A. Bogas, A. Gomes, and M. F. C. Pereira, “Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 1013–1022, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.111.
- [8] H. Li, Q. Deng, J. Zhang, B. Xia, and M. Skitmore, “Assessing the life cycle CO2 emissions of reinforced concrete structures: Four cases from China,” *J. Clean. Prod.*, vol. 210, no. 38, pp. 1496–1506, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.102.
- [9] S. Cunha, P. Leite, and J. Aguiar, “Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials,” *J. Energy Storage*, vol. 30, no. April, p. 101439, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101439.

- [10] O. Gencil, F. Koksall, C. Ozel, and W. Brostow, “Combined effects of fly ash and waste ferrochromium on properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 633–640, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.026.
- [11] L. xuan Mao *et al.*, “Multi-phase modelling of electrochemical rehabilitation for ASR and chloride affected concrete composites,” *Compos. Struct.*, vol. 207, no. April 2018, pp. 176–189, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.09.063.
- [12] Z. He, X. Zhu, J. Wang, M. Mu, and Y. Wang, “Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 965–973, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289.
- [13] K. H. Obla, “What is green concrete?,” *Indian Concr. J.*, vol. 83, no. 4, pp. 26–28, 2009.
- [14] B. Bhardwaj and P. Kumar, “Waste foundry sand in concrete: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 661–674, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010.
- [15] Z. Fan, F. Liu, W. Long, and G. Li, “A new low-cost method of reclaiming mixed foundry waste sand based on wet-thermal composite reclamation,” *China Foundry*, vol. 11, no. 5, pp. 402–407, 2014.
- [16] K. C. Bastian and J. E. Alleman, “Microtox(TM) characterization of foundry sand residuals,” *Waste Manag.*, vol. 18, no. 4, pp. 227–234, 1998, doi: 10.1016/S0956-053X(98)00030-0.
- [17] R. Siddique, G. de Schutter, and A. Noumowe, “Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 976–980, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.005.
- [18] S. Tsimas and M. Zervaki, “Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants,” *Manag. Environ. Qual. An Int. J.*, vol. 22, no. 1, pp. 7–17, 2011, doi: 10.1108/14777831111098444.
- [19] I. Al-Ghusain and M. J. Terro, “Use of treated wastewater for concrete mixing in Kuwait,” *Kuwait J. Sci. Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 213–228, 2003.
- [20] NP EN 13055, “Lightweight aggregates.” IPQ, p. 1, 2016.

- [21] Z. Abdollahnejad, M. Mastali, M. Falah, T. Luukkonen, M. Mazari, and M. Illikainen, “Construction and demolition waste as recycled aggregates in alkali-activated concretes,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 23, 2019, doi: 10.3390/ma12234016.
- [22] L. Henan Zhengzhou Mining Machinery Co., “Light Expanded Clay Aggregate Production Line,” 2021. [https://www.zkcomp.com/jianzhutaoli.html?s=s&keyword=leca production&matchtype=p&creative=216983104467&device=c&263614247=263614247&target=&placement=&gclid=EAIaIQobChMIgYvnlsHs8AIVgoxRCh3EZwh2EAA YASAAEgKgYPD_BwE](https://www.zkcomp.com/jianzhutaoli.html?s=s&keyword=leca%20production&matchtype=p&creative=216983104467&device=c&263614247=263614247&target=&placement=&gclid=EAIaIQobChMIgYvnlsHs8AIVgoxRCh3EZwh2EAA YASAAEgKgYPD_BwE).
- [23] NP EN 12620, “Agregados para betão.” IPQ, p. 61, 2002.
- [24] D. Dolage, “Offshore Sand as a Fine Aggregate for Concrete Production,” *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 813–825, 2013, doi: 10.9734/bjast/2014/3290.
- [25] M. Joel, “Use of crushed granite fine as replacement to river sand in concrete production,” *Leonardo Electron. J. Pract. Technol.*, vol. 9, no. 17, pp. 85–96, 2010.
- [26] U. S. Agrawal, S. P. Wanjari, and D. N. Naresh, “Impact of replacement of natural river sand with geopolymers fly ash sand on hardened properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, pp. 499–507, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.134.
- [27] G. Keifer and F. Effenberger, “濟無No Title No Title,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 6, no. 11, pp. 951–952, 1967.
- [28] M. U. Hossain, C. S. Poon, I. M. C. Lo, and J. C. P. Cheng, “Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 120, pp. 199–208, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.12.012.
- [29] E. Mokrzycki and A. Uliasz-Bocheńczyk, “Alternative fuels for the cement industry,” *Appl. Energy*, vol. 74, no. 1–2, pp. 95–100, 2003, doi: 10.1016/S0306-2619(02)00135-6.
- [30] A. Aranda Usón, A. M. López-Sabirón, G. Ferreira, and E. Llera Sastresa, “Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 242–260, 2013, doi:

10.1016/j.rser.2013.02.024.

- [31] W. Tangchirapat, T. Saeting, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, and A. Siripanichgorn, “Use of waste ash from palm oil industry in concrete,” *Waste Manag.*, vol. 27, no. 1, pp. 81–88, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2005.12.014.
- [32] K. H. Khayat, “Workability , Testing , and Performance of Self-Consolidating,” no. December, 2015.
- [33] F. I. Aneke and C. Shabangu, “Green-efficient masonry bricks produced from scrap plastic waste and foundry sand,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, p. e00515, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00515.
- [34] NP EN 1097-6, “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água;” IPQ, p. 52, 2016.
- [35] S. N. Shoukry, G. W. William, B. Downie, and M. Y. Riad, “Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 688–696, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.020.
- [36] NP EN 1097-5, “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 5: Determinação do teor de água por secagem em estufa ventilada;” IPQ, p. 13, 2011.
- [37] NP EN 933-1, “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados; Parte 1: Análise granulométrica; Método da peneiração.” IPQ, p. 20, 2014.
- [38] S. P. S. P. T. Wang and A. E. Naaman, “Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression,” *ACI J. Proc.*, vol. 75, no. 11, doi: 10.14359/10973.
- [39] W. . Moravia, A. G. Gumieri, and W. L. Vasconcelos, “Efficiency factor and modulus of elasticity of lightweight concrete with expanded clay aggregate,” *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 3, no. 2, pp. 195–204, 2010, doi: 10.1590/s1983-41952010000200005.
- [40] K. C. Thienel, T. Haller, and N. Beuntner, “Lightweight concrete-from basics to innovations,” *Materials (Basel).*, vol. 13, no. 5, 2020, doi: 10.3390/ma13051120.
- [41] T. Ingebrigtsen, “Stolma Bridge, Norway,” *Struct. Eng. Int.*, vol. 9, no. 2, pp. 100–102,

- 1999, doi: 10.2749/101686699780621109.
- [42] Statens vegvesen, “Stolma Bridge.” Austevoll, p. 1, 1998, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Stolma_Bridge.
- [43] A. Ozguven and L. Gunduz, “Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 6, pp. 781–787, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.007.
- [44] G. Muruges, “Lightweight Concrete and the New Benicia-Martinez Bridge,” *HPC Bridg. Views*, no. 49, p. n.p., May 2008, [Online]. Available: <http://www.hpcbridgeviews.com/i49/Article1.asp>.
- [45] J. Hamad Mohammed and A. J. Hamad, “Materials, properties and application review of lightweight concrete,” *Rev. Tec. la Fac. Ing. Univ. del Zulia*, vol. 37, no. 2, pp. 10–15, 2014.
- [46] S. Balbay, “Recycling of waste foundry sands by chemical washing method,” *China Foundry*, vol. 16, no. 2, pp. 141–146, 2019, doi: 10.1007/s41230-019-8144-4.
- [47] A. Seeni, “Experimental Study of Partial Replacement of Fine Aggregate with Waste Material from China Clay Industries,” *Int. J. Comput. Eng. Res.*, vol. 2, no. 8, pp. 167–171, 2012.
- [48] B. M. Silva, “Betão Leve Estrutural Com Agregados de Argila Expandida,” pp. 1–180, 2007.
- [49] A. Leite, J. P. Cruz, A. Fontes de Melo, and R. Magalhães, “Aplicação de um betão leve na reabilitação da Ponte de Fão,” pp. 1–8, 2008.
- [50] Álvaro Siza Vieira, “Pavilhão de Portugal.” Lisboa, p. 1, 1998, [Online]. Available: <https://www.visitportugal.com/pt-pt/content/pavilhao-de-portugal>.
- [51] Abel Maria Mota, “Ponte de Fão em Esposende.” p. 1, 1889, [Online]. Available: <https://www.lcwconsult.com/portfolio/n13-reabilitacao-e-reforco-da-ponte-de-fao/>.
- [52] NP EN 197-1, “Cimento ; Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.” IPQ, p. 39, 2012.

- [53] SECIL, “SUPRATEK CIMENTO PORTLAND - CEM I 42,5R,” p. 2, 2018.
- [54] Mibal, “Declaração de Desempenho N° 03 - Rev.01 - Meia Areia Branca.” Barqueiros, p. Braga Portugal, 2004.
- [55] Master Builders Solutions, “Técnica: MasterGlenium SKY 617,” *Master Build. Solut. España, S.L. - Sucursal em Port.*, pp. 1–3, 2019.
- [56] LNEC E394, “Determinação da Absorção de Água por Imersão - Ensaio à Pressão Atmosférica.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Portugal, p. 2, 1993.
- [57] “NP-EN-12390-7 - Ensaaios do betão endurecido, Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido.” 2003.
- [58] “LNEC E-393 - Betões: Determinação da absorção de água por capilaridade,” 1993.
- [59] “NP-EN-12390-3 - Ensaaios do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.” 2003.
- [60] “NP-EN-12390-5 - Ensaaios do betão endurecido, Parte 5: Resistência à flexão de provetes.” 2003.
- [61] BS EN 12390-13, “Testing hardened concrete Part 13 : Determination of secant modulus of elasticity in compression.” BS, p. 18, 2013.
- [62] “LMC-PE - 002 - (Betão) Resistividade eléctrica - Medição da resistividade eléctrica de uma superfície de um elemento de betão,” 2005.
- [63] NP EN 12504-4, “Ensaaios de Betão nas estruturas - Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons,” *Instituto Português da Qualidade*. p. 18, 2007.
- [64] “LNEC E 463 - Betão: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário.” 2004.
- [65] R. M. Ferreira, “Avaliação de ensaios de durabilidade do betão,” *Diss. apresentada à Esc. Eng. do minho para a obtenção do grau mestre em Eng. Civ. - Mater. e Reabil. da construção*, p. 246, 2000, [Online]. Available: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/40><http://hdl.handle.net/1822/40>.

- [66] EN 12390-12, “Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method.” CEN, p. 18, 2020.
- [67] LNEC E378, *Betões. Guia para a utilização de ligantes hidráulicos*. PORTUGAL: LNEC.
- [68] “LNEC E-394 - Betões: Determinação da absorção de água por imersão,” 1993.
- [69] J. Brito, “Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões. Lição de síntese para provas de agregação’. Lisboa.” 2005.
- [70] T. C. Hansen, “Recycling of demolished concrete and masonry. Part one: recycled aggregates and recycled aggregate concrete.” London, 1992.