



Comportamento mecânico de betões sustentáveis produzidos com água salgada e agregados reciclados

Lena Kravchanka

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Doutor Miguel Nuno Caneiras Bravo

Júri

Presidente: Professor Doutor José Alexandre De Brito Aleixo Bogas

Orientador: Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Vogal(is): Doutor João Nuno Noronha Ramos Vigário Pacheco

Tenente-Coronel de Engenharia Pedro José da Silva Gonçalves Matias

Outubro de 2022

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Dedicatória

Às minhas avós, Liubov e Maria

Agradecimentos

Esta dissertação tem um significado especial, significa que terminei mais uma fase da minha formação acadêmica. Não direi que tenha sido fácil, mas também se assim fosse, não estaria aqui. Porém, nada disso seria verdade sem aqueles que participaram neste percurso. Assim, o meu obrigada vai para as seguintes pessoas.

Ao Professor Doutor Jorge de Brito, orientador científico desta dissertação, por ter-me dado a oportunidade de realizar esta dissertação e pelo rigor exigido no processo de escrita.

Ao Professor Doutor Miguel Bravo, investigador desta dissertação, pelo tempo dedicado, pelos conselhos e pela experiência.

Ao Tenente-Coronel Matias pela atenção prestada durante estes anos como diretor de curso.

À minha colega e amiga Carolina Caracol, só ela sabe quanto esforço e dedicação exigiu a disponibilização de 500 litros de água do mar vinda da Ericeira e todo o trabalho exigido no processo das betonagens, o meu sincero obrigada.

Aos técnicos do Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil do IST, Francisco Almeida, Pedro Costa e Jorge Pontes, pela ajuda prestada no decorrer da campanha experimental.

A todos os que conheci no laboratório, Renato, Lucas, Javier e muitos mais, obrigada por partilharem comigo a vossa experiência.

Ao professor Manuel Francisco, pela sua disponibilidade e por nos ter deixado usar o Laboratório de Minas que foi essencial no processo de trituração dos agregados.

À empresa Vimajas, por disponibilizar os agregados reciclados necessários para o desenvolvimento da campanha experimental.

Aos meus camaradas, amigos e todos os outros que conheci na Academia Militar, porque nunca teria chegado onde cheguei, nem seria o que sou, sem vocês.

À minha amiga Daniela Falacho, por partilhar esta caminhada comigo, pelo seu apoio e amizade.

Ao Alexandre Almeida, meu futuro marido, por toda a sua paciência, compreensão e apoio dado ao longo destes 7 anos de curso.

Aos meus amigos, Susana e André, pela sua ajuda prestada na revisão do texto.

À minha família, pela motivação dada durante todo este percurso.

Resumo

Esta dissertação visa analisar a viabilidade da utilização de água do mar em betões, tanto na composição como na cura, em detrimento de água potável. Pretende-se também avaliar o comportamento mecânico de betões produzidos com diferentes percentagens de substituição de agregados naturais (AN) grossos por agregados reciclados (AR) grossos (0, 50 e 100%).

A realização da campanha experimental iniciou-se pela recolha e posterior peneiração dos AR, bem como pela recolha da água do mar necessária para a composição e cura dos betões.

A 7 dias de idade, o betão com água do mar na composição e cura em água potável apresenta uma resistência à compressão menor do que era esperado. Nos betões com água potável na composição, a cura com água do mar diminui a resistência à compressão em todas as idades e em qualquer taxa de substituição. Nos betões com água do mar na composição e 100% de AR, a cura em água do mar melhorou a resistência à tração em comparação com a cura em água potável. O módulo de elasticidade varia muito pouco com o tipo de cura, mas diminui com a utilização de água do mar na composição do betão. Ao incorporar AR e água do mar no betão, também se observou uma tendência de melhoria na resistência à abrasão, quando comparado com o betão de referência.

Na maioria dos ensaios, a utilização simultânea de AR e água do mar, tanto na composição como na cura, provoca perdas significativas no desempenho.

Palavras-chaves: betão; sustentabilidade; água do mar; agregados reciclados.

Abstract

This dissertation intends to analyse the feasibility of using seawater in concrete, both in the composition and in curing, in detriment of potable water. It also intends to evaluate the mechanical behaviour of concrete produced with different percentages of replacement of coarse natural aggregates (NA) with coarse recycled aggregates (RA) (0%, 50% and 100%).

The experimental campaign was started by the collection and subsequent sieving of the recycled aggregates, as well as by the collection of the seawater necessary for the composition and curing of the concrete mixes.

At 7 days of age, concrete with seawater in its composition and potable water curing presents a compressive strength lower than expected. In the mixes with potable water in their composition, curing with seawater decreases the compressive strength at all ages and at any replacement ratio. In mixes with seawater in the composition and 100% RA, curing in seawater improved the tensile strength compared to curing with potable water. The modulus of elasticity varies very little with the type of curing, but decreases with the use of seawater in the concrete composition. By incorporating recycled aggregates and seawater in concrete, a trend of improvement in abrasion resistance was also observed when compared to the reference concrete.

In most tests, the simultaneous use of recycled aggregates and seawater, both in the composition and curing, causes significant losses in performance.

Keywords: concrete; sustainability; seawater; recycled aggregates.

Índice

Dedicatória	v
Agradecimentos.....	vii
Resumo	ix
Abstract.....	xi
Índice	xiii
Índice de figuras	xvii
Índice de quadros	xix
Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Siglas.....	xxi
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivos da dissertação	1
1.3. Metodologia e organização	1
2. Estado da arte	3
2.1. Introdução.....	3
2.2. Água do mar	4
2.3. Resíduos de construção e demolição	4
2.4. Propriedades do betão com água do mar	6
2.4.1. Resistência à compressão	9
2.4.2. Resistência à tração	12
2.4.3. Resistência à flexão	13
2.4.4. Módulo de elasticidade.....	13
2.5. Propriedades do betão com agregados grossos reciclados	14
2.5.1. Resistência à compressão	16
2.5.2. Resistência à tração	17
2.5.3. Resistência à flexão	18

2.5.4. Módulo de elasticidade.....	19
2.5.5. Ultrassons.....	20
2.5.6. Resistência à abrasão.....	21
2.6. Propriedades do betão com água do mar e agregados grossos reciclados.....	22
2.6.1. Resistência à compressão.....	23
2.6.2. Resistência à tração.....	25
2.6.3. Resistência à flexão.....	25
2.6.4. Módulo de elasticidade.....	26
3. Descrição da campanha experimental.....	27
3.1. Introdução.....	27
3.2. Planeamento da campanha experimental.....	27
3.3. Materiais dos betões.....	28
3.4. Composição e produção dos betões.....	29
3.4.1. Processo de determinação composicional.....	29
3.4.2. Composição do betão de referência.....	31
3.4.3. Betões produzidos.....	31
3.5. Ensaio aos agregados.....	32
3.5.1. Análise granulométrica.....	32
3.5.2. Baridade.....	34
3.5.3. Massa volúmica e absorção de água.....	35
3.5.4. Desgaste de Los Angeles.....	38
3.5.5. Análise composicional.....	39
3.6. Ensaio ao betão no estado fresco.....	39
3.6.1. Abaixamento do cone de Abrams.....	39
3.6.2. Massa volúmica no estado fresco.....	40
3.7. Ensaio ao betão no estado endurecido.....	40
3.7.1. Resistência à compressão.....	40
3.7.2. Resistência à tração.....	41

3.7.3. Módulo de elasticidade.....	42
3.7.4. Ultrassons.....	43
3.7.5. Resistência à abrasão.....	43
4. Análise e discussão dos resultados.....	45
4.1. Introdução.....	45
4.2 Propriedades dos agregados.....	45
4.2.1. Análise granulométrica.....	45
4.2.2. Baridade.....	46
4.2.3. Massa volúmica e absorção de água.....	46
4.2.4. Desgaste de <i>Los Angeles</i>	47
4.2.5. Análise composicional.....	47
4.2.6. Síntese.....	48
4.3. Propriedades do betão no estado fresco.....	48
4.3.1. Trabalhabilidade.....	48
4.3.2. Massa volúmica.....	49
4.3.3. Síntese.....	50
4.4. Propriedades do betão no estado endurecido.....	51
4.4.1. Resistência à compressão.....	51
4.4.2. Resistência à tração.....	54
4.4.3. Módulo de elasticidade.....	56
4.4.4. Ultrassons.....	57
4.4.5. Resistência à abrasão.....	60
4.4.6. Síntese.....	61
5. Conclusões.....	63
5.1. Considerações finais.....	63
5.2. Conclusões gerais.....	63
5.2.1. Caracterização dos betões no estado fresco.....	63
5.2.2. Caracterização dos betões no estado endurecido.....	64

5.3. Desenvolvimentos futuros	66
Referências bibliográficas	69
Anexo A - Fichas de materiais utilizados	i
Anexo A1 - Características do cimento Portland CEM I 42,5 R	i
Anexo A2 - Ficha técnica do superplastificante	ii
Anexo A3 - Ficha de certificação das areias naturais	iii
Anexo A4 - Fichas de certificação das britas	iv
Anexo B - Calendarização da campanha experimental	v
Anexo C - Resultados dos ensaios aos agregados	vi
Anexo C1 - Análise granulométrica	vi
Anexo C2 - Absorção de água	vi
Anexo C3 - Evolução da absorção de água dos AR grossos	vii
Anexo C4 - Análise composicional	vii
Anexo D - Ensaio ao betão no estado fresco	viii
Anexo E - Resultados dos ensaios mecânicos realizados aos betões	ix
Anexo E1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão	ix
Anexo E2 - Resultados do ensaio de resistência à tração	xi
Anexo E3 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade	xii
Anexo E4 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão	xiii
Anexo E5 - Resultados do ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons	xvii

Índice de figuras

Figura 2.1 - Propostas de valorização dos RCD	5
Figura 2.2 - Sal de Friedel e etringite existente no betão a 28 dias de idade.....	8
Figura 2.3 - Desenvolvimento da resistência tendo em conta o efeito da cura com água do mar	9
Figura 2.4 - Efeito da água do mar na resistência à compressão.....	10
Figura 2.5 - Efeito da água potável na composição com a água potável / água do mar na cura para diferentes tipos de agregados	11
Figura 2.6 - Efeito da água potável / água do mar na composição com a água do mar na cura para diferentes tipos de agregados	11
Figura 2.7 - Resistência à compressão a 7, 28 e 91 dias	12
Figura 2.8 - Resistência à tração	13
Figura 2.9 - Módulo de elasticidade em relação a resistência à compressão em cilindros (MPa)	14
Figura 2.10 - Resistência à compressão de AR para diferentes estudos experimentais	16
Figura 2.11 - Resistência à tração de AR para diferentes estudos experimentais	18
Figura 2.12 - Módulo de elasticidade de AR para diferentes estudos experimentais	20
Figura 2.13 - Velocidade de ultrassom vs. AR vs. idade	21
Figura 2.14 - Resistência à compressão de betões com AR.....	23
Figura 2.15 - Resistência à compressão com as alterações efetuadas	24
Figura 2.16 - Resistência à compressão com diferentes tipos de ligante aos 7 e 28 dias	25
Figura 2.17 - Resistência à tração	25
Figura 3.1 - Curvas de referência de Faury, com e sem cimento	30
Figura 3.2 - Curva de referência de Faury	30
Figura 3.3 - Corte e distribuição dos pontos de referência (mm)	43
Figura 4.1 - Análise granulométrica dos diferentes agregados utilizados	45
Figura 4.2 - Evolução da absorção de água de AR	47
Figura 4.3 - Composição dos RCD oriundos da central de reciclagem Vimajas	48
Figura 4.4 - Massa volúmica no estado fresco dos betões.....	50
Figura 4.5 - Relação entre massa volúmica no estado fresco e endurecido	50

Figura 4.6 - Variação da resistência à compressão com a idade	51
Figura 4.7 - Resistência à compressão em cubos a: (a) 7 dias de idade; (b) 28 dias de idade e (c) 91 dias de idade.....	52
Figura 4.8 - Resistência à compressão com água potável na composição	53
Figura 4.9 - Resistência à compressão com água do mar na composição	53
Figura 4.10 - Superfícies de rotura verificadas no ensaio de tração por compressão diametral.....	54
Figura 4.11 - Resistência à tração aos 28 dias de idade	55
Figura 4.12 - Relação linear entre a resistência à compressão e a resistência à tração	56
Figura 4.13 - Módulo de elasticidade a 28 dias de idade.....	56
Figura 4.14 - Velocidade de propagação de ultrassons a 7, 28 e 91 dias de idade	58
Figura 4.15 - Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons e a resistência à compressão	59
Figura 4.16 - Relação linear entre os ultrassons e a massa volúmica no estado endurecido.....	60
Figura 4.17 - Desgaste por abrasão medido em perda de massa.....	61

Índice de quadros

Quadro 2.1 - Composição de RCD	5
Quadro 2.2 - Resistência à tração.....	13
Quadro 2.3 - Resistência à flexão	13
Quadro 2.4 - Abaixamento e relação A/C efetiva das misturas de betão	15
Quadro 2.5 - Resistência à compressão das misturas de betão com AR, em cubos, a 7, 28 e 56 dias	16
Quadro 2.6 - Resistência à compressão a 7 e 28 dias	17
Quadro 2.7 - Resistência à tração por compressão diametral.....	18
Quadro 2.8 - Resistência à flexão de betões com AR e água potável	19
Quadro 2.9 - Módulo de elasticidade de betões com AR.....	19
Quadro 2.10 - Módulo de elasticidade	20
Quadro 2.11 - Resistência à abrasão (medida em perda de massa)	22
Quadro 2.12 - Resultados da resistência à flexão com a água do mar	26
Quadro 2.13 - Resultados do módulo de elasticidade com a água do mar	26
Quadro 3.1 - Ensaio e normas utilizados nos agregados	28
Quadro 3.2 - Ensaio e normas utilizadas no estado fresco do betão	28
Quadro 3.3 - Ensaio e normas utilizados no estado endurecido do betão	28
Quadro 3.5 - Composição do betão de referência	31
Quadro 3.6 - Constituição dos betões produzidos	32
Quadro 4.1 - Baridade dos agregados naturais e reciclados.....	46
Quadro 4.2 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados.....	46
Quadro 4.3 - Resistência ao desgaste de <i>Los Angeles</i> dos agregados grossos	47
Quadro 4.4 - Abaixamento do cone de Abrams (mm)	49
Quadro 4.5 - Massa volúmica no estado fresco (kg/m^3)	49
Quadro 4.6 - Coeficientes de regressão linear da resistência à compressão	54
Quadro 4.7 - Coeficientes de regressão linear da resistência à tração com o aumento da taxa de substituição de agregados.....	55

Quadro 4.8 - Variação da resistência à tração, relativamente ao BR	55
Quadro 4.9 - Coeficientes de regressão linear do módulo de elasticidade com o aumento da taxa de substituição de agregados.....	57
Quadro 4.10 - Módulo de elasticidade a 28 dias de idade.....	57
Quadro 4.11 - Variação do módulo de elasticidade, relativamente ao BR	57
Quadro 4.12 - Variação dos ultrassons ao longo da idade relativamente ao BR	59
Quadro 4.13 - Variação da resistência por abrasão com água potável (medida em perda de massa)	60
Quadro 4.14 - Variação da resistência por abrasão com água do mar (medida em perda de massa)	60
Quadro 5.1 - Resultados dos ensaios ao betão no estado fresco	64
Quadro 5.2 - Propriedades mecânicas dos betões no estado endurecido	65

Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Siglas

A/C	➤ Relação água-cimento
AGN	➤ Agregados grossos naturais
AGR	➤ Agregados grossos reciclados
AN	➤ Agregados naturais
AR	➤ Agregados reciclados
ASTM	➤ <i>American Society for Testing and Materials</i>
BR	➤ Betão de referência, produzido sem agregados reciclados e água do mar
$Ca(OH)_2$	➤ Hidróxido de cálcio
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	➤ Gesso
Cl^-	➤ Iões de cloreto
CO_2	➤ Dióxido de carbono
C_2S	➤ Silicato bicálcico
C_3A	➤ Aluminato tricálcico
C_3S	➤ Silicato tricálcico
$C_4A_3S^-$	➤ Sulfoaluminato de cálcio
CV	➤ Cinzas volantes
$D_{máx}$	➤ Máxima dimensão dos agregados (mm)
$f_{cm,x}$	➤ Resistência à compressão a x dias
IST	➤ Instituto Superior Técnico
K^+	➤ Catiões de sódio
K_2SO_4	➤ Sulfato de potássio
LC	➤ Laboratório de Construção
LNEC	➤ Laboratório Nacional de Engenharia Civil
$Mg(OH)_2$	➤ Hidróxido de magnésio solúvel
$MgSO_4$	➤ Sulfato de magnésio
$NaCl$	➤ Cloreto de sódio

NC	➤ Nitrato de cálcio
OH ₋	➤ Hidróxido
OPC	➤ Cimento Portland
P-CP-X	➤ Betão com água potável na composição e na cura com X% de AR grossos
P-CS-X	➤ Betão com água potável na composição e cura em água do mar com X% de AR grossos
RCD	➤ Resíduos de construção e demolição
SA	➤ Sílica ativa
SAC	➤ Cimento de sulfoaluminatos
SC	➤ Sílica coloidal
S-CP-X	➤ Betão com água do mar na composição e cura em água potável com X% de AR grossos
S-CS-X	➤ Betão com água do mar na composição e na cura com X% de AR grossos
SO ₄ ²⁻	➤ Iões de sulfato
SP	➤ Superplastificante
ZTI	➤ Zona de transição interfacial

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

De acordo com o Conselho Nacional da Água, a Terra é constituída por 70% de água, sendo que apenas 7% dessa água é potável. A água potável é um dos recursos mais preciosos da Terra e, tendo em vista o seu elevado consumo, é um grande desafio aprender a poupá-la devido à sua escassez em muitas partes do mundo. Assim sendo, é fundamental encontrar fontes alternativas, de modo a economizar este recurso. A substituição da água potável por água do mar na composição do betão poderá ser uma solução benéfica para futuras construções, não só reduzindo os custos de construção, mas também a emissão de CO₂.

A acumulação de resíduos da construção e demolição (RCD) nos aterros também causa grandes preocupações ambientais. Assim, o uso de agregados reciclados (AR) grossos, como alternativa aos agregados naturais (AN) grossos, permite mitigar o consumo de energia e a poluição ambiental.

O betão é o material de construção mais utilizado em todo o mundo, sendo acompanhado de enormes emissões de carbono e impactes negativos no meio ambiente. Neste contexto, para reduzir o consumo de energia e economizar recursos naturais, obtendo um betão mais “verde”, o uso de água do mar e de AR grossos torna-se uma opção promissora, permitindo também um alívio na crise de recursos e no custo da construção, principalmente nas zonas costeiras e insulares.

1.2. Objetivos da dissertação

O presente estudo visa analisar a viabilidade da substituição de água potável por água do mar e de agregados naturais por agregados reciclados em betões. Deste modo, o trabalho experimental estabelece uma comparação entre doze tipos de betão. Serão analisadas diversas características dos betões no estado fresco, como também o desempenho dos betões produzidos no estado endurecido, em termos mecânicos.

A campanha experimental desta dissertação realizou-se em conjunto com a aluna Carolina Caracol, que estudou diversas características dos betões produzidos ao nível da durabilidade.

1.3. Metodologia e organização

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, nomeadamente:

- Introdução - capítulo 1: apresenta os principais motivos que levaram à elaboração desta dissertação e os objetivos da mesma. Por último, é apresentada a metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos;
- Estado de arte - capítulo 2: corresponde a um levantamento da literatura nacional e internacional existente sobre a incorporação de água do mar e/ou AR grossos em detrimento de água potável e/ou AN grossos no betão, bem como a cura com água potável / água do mar do betão. Neste capítulo, são apresentadas as possíveis utilizações na construção e as características mecânicas do betão com as componentes estudadas, em comparação com as

componentes habituais. Também são referidas as propostas sugeridas em outros estudos, de modo a melhorar a qualidade do betão com água do mar e/ou AR grossos;

- Campanha experimental - capítulo 3: visa descrever a composição dos diferentes betões produzidos, o modo de produção e o material necessário. São também descritos os ensaios realizados, de modo a caracterizar os agregados e os betões no estado fresco e endurecido;
- Análise e discussão de resultados - capítulo 4: apresenta os resultados obtidos através dos ensaios realizados, assim como as possíveis conclusões em termos mecânicos, comparando com os resultados obtidos no capítulo 2;
- Conclusões e desafios futuros - capítulo 5: pretende verificar a viabilidade em substituir água potável por água do mar e AN por AR em termos do comportamento mecânico dos betões, como base nos resultados obtidos no capítulo 4. Também se faz algumas propostas para futuras investigações, de modo a melhorar a análise do desempenho da água do mar e dos AR na constituição do betão.

No final da presente dissertação, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste estudo, assim como os anexos referenciados ao longo dos diferentes capítulos.

2. Estado da arte

2.1. Introdução

De acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (WMO), o acesso a água potável tem uma grande importância na saúde das pessoas e na sustentabilidade ambiental. Por isso, a escassez de água potável pode provocar problemas políticos e sociais. Mais de 780 milhões de pessoas, cerca de 11% da população mundial, não têm acesso a água potável. Os recursos hídricos encontram-se em esgotamento, acrescentando-se a constante procura desse bem, gerando ainda mais pressão. Segundo o *United Nations Environment Programme* (2021), a indústria da construção emite cerca de 10% do CO₂ emitido para a atmosfera por todas as atividades humanas. Por outro lado, mais de 50 bilhões de toneladas de agregados naturais (AN) são extraídos anualmente, correndo o risco de esgotar, em zonas específicas, os recursos da natureza (Hafez *et al.*, 2021). Os resíduos da construção e demolição (RCD) são resíduos sólidos urbanos que são depositados em aterros sanitários em todo o mundo e são responsáveis segundo Eurostat por 37% do total de resíduos descartados (Wang *et al.*, 2021).

Neste contexto, a água do mar e os agregados grossos reciclados (AGR) surgem como componentes alternativos nas misturas do betão. Segundo a Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE), a ideia de produzir estruturas de betão com RCD surgiu na Europa durante a 2ª Guerra Mundial. Segundo a ASCE, com esta alternativa, é possível reduzir aproximadamente 60 e 58% das emissões dos gases de estufa e do consumo de energias não renováveis, respetivamente, na produção do betão. Assim, torna-se logicamente uma opção vantajosa do ponto de vista da sustentabilidade.

Por outro lado, foi ao longo da costa da Califórnia e da Flórida que surgiram as primeiras estruturas construídas com o recurso a água do mar. A produção do betão usando água potável está a crescer ano após ano, representando uma verdadeira ameaça ambiental e causando um grande impacto nas zonas onde este recurso é escasso, consumindo cerca de dois bilhões de toneladas da água anualmente. A escassez da água é um dos principais problemas do século XXI. Para reduzir o consumo de água potável na indústria da construção civil e nos seus processos envolventes (lavagem das betoneiras, cura das estruturas de betão, etc.) e tornar a construção mais sustentável, o uso de água do mar tem estado a ser explorado, tanto enquanto água de composição como para água de cura no betão (Goyal e Karade, 2020).

O atual capítulo pretende apresentar, de forma explícita e concisa, o avanço científico existente relativamente à utilização da água do mar na composição e na cura do betão, em detrimento da água potável, bem como relativamente à utilização de agregados grossos reciclados em substituição de agregados grossos naturais.

Inicialmente, são apresentadas algumas características da água do mar e dos AGR. Seguidamente, são analisadas as propriedades mecânicas do betão que contém água do mar ou AGR. Por fim, são analisadas as características do betão com água do mar e AGR simultaneamente, através de estudos realizados por diferentes investigadores. As propriedades mecânicas tidas em conta foram: resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão, módulo de elasticidade, velocidade de propagação dos ultrassons e resistência à abrasão. Existem poucos estudos realizados até ao

momento sobre betões com água do mar e AGR, o que demonstra o interesse do tema da presente dissertação, bem como a necessidade de realizar estudos e pesquisas adicionais.

2.2. Água do mar

Gani (1997) indica que o valor do pH da água do mar varia entre 7,4 e 8,4, sendo que a corrosão dos varões de aço ocorre para pH abaixo de 11. A água do mar contém principalmente iões de cloreto, sódio, magnésio, cálcio e potássio, em que o principal sal é o cloreto de sódio (aproximadamente 88%) (Wegian, 2010).

Segundo Gua *et al.* (2020), as características da água do mar dependem do local de recolha. Newman (1968), Kucche *et al.* (2015) e Etxeberria *et al.* (2016) afirmam que, em comparação com a água potável, a água do mar contém teores de sal muito elevados, representados pelos altos teores de iões de cloreto (Cl^-), iões de sulfato (SO_4^{2-}) e catiões de sódio (K^+).

Katano *et al.* (2013) afirmam que é proibido o uso de água do mar em estruturas de betão armado, ao contrário do que se verifica em betão não estrutural. A água do mar pode ser incorporada em vários elementos de betão não armado, incluindo blocos de betão, pavimentos ou betões leves, onde o reforço não é necessário. Nos últimos anos, foram desenvolvidas armaduras não sujeitos a corrosão, como, por exemplo, varões reforçados com fibras de carbono, aço inoxidável e armaduras revestidas com resina epóxida. De acordo com Xiao *et al.* (2017), uma opção de uso mais acessível dentro dos Polímeros Reforçados com Fibra é a Fibra de Vidro. Esta fornece uma solução atrativa que pode substituir o uso do aço como material de reforço e resolver os problemas de durabilidade em estruturas de betão armado que contenham água do mar.

2.3. Resíduos de construção e demolição

Etxeberria *et al.* (2016), citando a Eurostat, afirmam que a população mundial e a consequente necessidade de infraestruturas se encontram em expansão, o que leva a um aumento significativo dos RCD. A elevada quantidade de RCD descartados todos os anos e o baixo nível de reciclagem são duas grandes preocupações económicas e ambientais da atualidade, sendo imperativo evitar a abertura de novos aterros.

Os RCD são gerados sempre que um edifício, uma estrada, uma ponte, uma estrutura industrial ou uma instalação fabril são construídos, reparados, reabilitados ou demolidos (Kumar, 2017).

Medina *et al.* (2014) e Kumar (2017) afirmam que os RCD são materiais altamente heterogéneos, compostos por uma ampla gama de materiais, como betão, asfalto, madeira, gesso cartonado, cimento, vidro, plástico, metal, materiais isolantes, carpetes, materiais de cobertura e outros materiais similares produzidos (Quadro 2.1). A composição destes materiais depende fortemente da sua localidade de origem. De acordo com Medina *et al.* (2014), o material à base da argila apresenta elevada rugosidade, enquanto os resíduos de asfalto e betão são mais arredondados. Segundo Galloway (1994), as características do betão com AR são afetadas pela forma das partículas de AR. Por exemplo, Evangelista e Brito (2007) afirmam que as formas mais angulosas dos AR reduzem a compacidade dos betões.

Segundo Oikonomou (2005), os RCD têm sido valorizados em diferentes aplicações, como fundações, pavimentos, estabilizantes do solo e substitutos parciais / totais dos AN grossos na produção de betão. Jiménez *et al.* (2012) e Tabsh e Abdelfatah (2009) destacam as possíveis utilizações de AR como

material em bases rodoviárias e sub-bases e referem que essas utilizações têm consequências positivas, tanto ambientais (redução da extração dos recursos naturais, menores emissões de CO₂ e menor armazenamento em aterros) como económicas (menores custos de transporte e energia). Assim, o uso de AR tem um impacto ambiental muito menor do que a utilização de AN.

Quadro 2.1 - Composição de RCD (adaptado de Medina *et al.*, 2014 e Matias *et al.*, 2013)

Medina <i>et al.</i> , 2014		Matias <i>et al.</i> , 2013	
Composição (%)	Quantidade (% em peso)		Composição (%)
Betão, produtos de betão, argamassa	45,6	79,8	Betão, argamassa e areia natural
Agregado não consolidado, pedra natural	28,1	11,1	Alvenaria - material argiloso
Material cerâmico	5,3	1,0	Vidro
Asfalto	19,3	6,2	Materiais betuminosos
Outros e vidro	1,7	2,0	Outros

Os AR têm maior absorção de água do que os AN. Esta característica tem aumentado a aceitação destes materiais na construção de estradas e em alguns parques de estacionamento onde as águas superficiais permanecem por muito tempo (Abera, 2022).

Hansen (1986) e Brito e Robles (2010) afirmam que, quando a água que os AR absorvem não é compensada, a trabalhabilidade dos betões diminui comparativamente aos AN. Isto acontece devido ao facto de os AR absorverem a água livre da amassadura, que tinha como função lubrificar a mistura e conferir plasticidade ao betão. A rugosidade e a forma das partículas de AR também diminui a trabalhabilidade, de acordo com Bravo *et al.* (2015). Segundo Pereira (2002) e Bravo *et al.* (2015), quanto maior for a percentagem de AR existentes na mistura do betão, maior terá que ser a relação A/C efetiva, de modo a obter a mesma trabalhabilidade.

A utilização destes materiais não só ajuda a criar um ambiente livre de resíduos, como também traz benefícios económicos. Algumas utilizações propostas para os RCD são: bancos de assento dos parques, paredes internas pré-fabricadas, floreiras, postes elétricos e outros que não necessitam de alta resistência do betão (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Propostas de valorização dos RCD (adaptado de Abera, 2022)

Segundo Silva *et al.* (2018), os RCD têm uma textura áspera/granular, devido ao esmagamento do material original, e mais rugosa, causada por vários ciclos de reciclagem. As partículas de betão presentes nos AR de RCD, que correspondem normalmente ao principal constituinte dos RCD, têm maior porosidade do que os AN, por causa da argamassa porosa aderida à superfície e da sua maior

angularidade, ficando o ar preso nas superfícies do agregado. Assim, é necessária uma maior quantidade de água (ou energia) para a compactação devido ao atrito entre as partículas (Behera *et al.*, 2014 e Etxeberria *et al.*, 2007). De acordo com Agrela *et al.* (2011), Martín-Morales *et al.* (2011) e Medina *et al.* (2014), as propriedades mais prejudiciais dos AR de RCD, quando comparados aos AN, são a massa volúmica, a absorção de água e o teor das partículas contaminantes, em particular a argila e o gesso, que pode levar a possíveis pressões de expansão devido ao ataque interno dos sulfatos.

De acordo com Butera *et al.* (2014), os RCD podem conter poluentes orgânicos persistentes (PCBs e PAHs). A composição e as propriedades de lixiviação também são relevantes do ponto de vista ambiental. A lixiviação dos poluentes pode afetar o solo subjacente e potencialmente as águas subterrâneas, com efeitos tóxicos no ecossistema e potenciais consequências para a saúde humana através da exposição indireta, além de potencial deterioração dos recursos da água potável.

2.4. Propriedades do betão com água do mar

De acordo com Shi *et al.* (2015), Adiwijaya *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2018), a água do mar tem um efeito benéfico na diminuição da porosidade da pasta de cimento após 28 dias de cura, pois contribui para a diminuição da porosidade total e refinamento da estrutura porosa da pasta de cimento.

Nishida *et al.* (2015) alegam que, quanto maior o teor de cloretos solúveis em água do mar, menor a capacidade de imobilização de cloretos livres na matriz de cimento, ou seja, maior o risco de corrosão precoce do aço representando um risco maior na sua utilização.

Gua *et al.* (2020) afirmam que as propriedades do betão com água do mar variam consoante as diferentes regiões. Os resultados dos ensaios do Teng *et al.* (2019) mostram que o uso de água do mar causa uma diminuição na trabalhabilidade, tempo de presa e massa volúmica, comparando com água potável. A diferença na trabalhabilidade e no tempo de presa causada pelo tipo de água na composição do betão é atribuída à presença de grandes quantidades de NaCl contidos na água do mar que aceleram a hidratação de cimento (Li *et al.*, 2018 e JCI, 2015).

De acordo com Kaushik e Islam (1995), é recomendado o uso de água do mar na produção do betão simples e até mesmo para o betão armado permanentemente submerso. No entanto, esta ainda é uma área que requer mais estudos e pesquisas, principalmente no que respeita ao uso deste tipo de betão em estruturas marinhas localizadas na zona de marés.

Neville (1995) e Hewlett *et al.* (2004) referem que o principal aspeto negativo do uso de água do mar na produção do betão é a sua influência nas propriedades da durabilidade. A água do mar contém sais dissolvidos, tais como o cloreto, o sulfato e o magnésio que podem produzir reações químicas, alterações físicas na microestrutura e expansões. Otsuki (1985) descobriu que a influência negativa do cloreto contido na água do mar diminui com a idade.

Gani (1997) indica que as reações químicas da água do mar no betão ocorrem principalmente devido ao ataque do sulfato de magnésio ($MgSO_4$). O modo de ataque é a cristalização. De acordo com Stark (2002) e Mehta e Monteiro (2014), o processo de cristalização dos sais nos poros do betão é um dos principais motivos de preocupação devido à deterioração que pode ser causada por surgirem tensões internas.

De acordo com Wegian (2010) e Younis *et al.* (2018), os sulfatos de potássio (K_2SO_4) e $MgSO_4$ presentes na água do mar podem causar uma reação do sulfato no betão, pois podem reagir inicialmente com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), que está presente no cimento endurecido, e que foi formado pela hidratação do silicato bicálcico (C_2S) e do silicato tricálcico (C_3S). O ataque do $MgSO_4$ existente na água do mar é particularmente prejudicial, formando hidróxido de magnésio solúvel ($Mg(OH)_2$) e levando ao surgimento de gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Swamy, 1991). Segundo Wegian (2010) e Younis *et al.* (2018), estas fases podem causar uma pressão de cristalização expansiva que resulta numa diminuição da resistência à compressão em idade tardia. Uddin *et al.* (2004) afirmam que os Cl^- podem penetrar no betão e causar uma corrosão acelerada dos varões. A reação química da pasta de cimento com o alto teor de cloreto da água do mar é geralmente leve e não é a principal causa de preocupação.

De acordo com Otsuki *et al.* (2011) e Shi *et al.* (2015), a microestrutura do betão melhora precocemente devido à reação química da água do mar que, por sua vez, é o resultado da aceleração do processo de hidratação criado pela entrada de Cl^- . A água do mar apresenta uma concentração mais elevada de cloretos alcalinos, sulfatos ou sódio do que a água potável (Etxeberria *et al.*, 2016).

Segundo Goyal e Karade (2020), a presença de alto teor de cloretos na água do mar danifica a camada passiva ao redor da barra de aço, deteriora a matriz de massa, aumenta os vazios e diminui a resistência do betão.

Nagabhushana *et al.* (2017) e Wegian (2010) verificaram que os provetes com a água do mar na composição e na cura do betão apresentavam superfícies mais escuras do que os provetes de referência com água potável na composição e na cura. Wegian (2010) constatou que se formaram depósitos de sal na superfície dos provetes curados em água do mar.

Montanari *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2018) compararam a calorimetria isotérmica das pastas de cimento com água potável e com água do mar, revelando que a taxa de hidratação e a libertação de calor da pasta de cimento com água do mar é maior, em idades precoces.

Xu *et al.* (2019) indicam que, comparando com o cimento Portland (OPC), o cimento de sulfoaluminatos (SAC) pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas do betão dos recifes artificiais com água do mar em idades precoces. Isto não acontece com o cimento misto (OPC mais SAC), em que se verifica uma redução drástica das propriedades mecânicas do betão. Os resultados são atribuídos principalmente ao facto do SAC conter uma grande quantidade de $C_4A_3S^-$ (sulfoaluminato de cálcio). Após a hidratação, isto gera um novo produto de hidratação do SAC. Este produto oxida quimicamente os Cl^- introduzidos pela água do mar e produz o sal de Friedel de baixa solubilidade (Jones *et al.*, 2003 e Yang *et al.*, 2018). O sal de Friedel atua como um enchimento nos poros do betão e melhora a estrutura dos poros, aumentando a compacidade do betão e melhorando as propriedades mecânicas do betão.

O sal de Friedel foi observado nos provetes com água do mar, e deve-se à reação de C_3A com $CaCl_2$ da água do mar (Equação 2.1).



De acordo com, Goyal e Karade (2020), quanto maior a formação do sal de Friedel (Figura 2.2), maior a ligação dos cloretos ao betão.

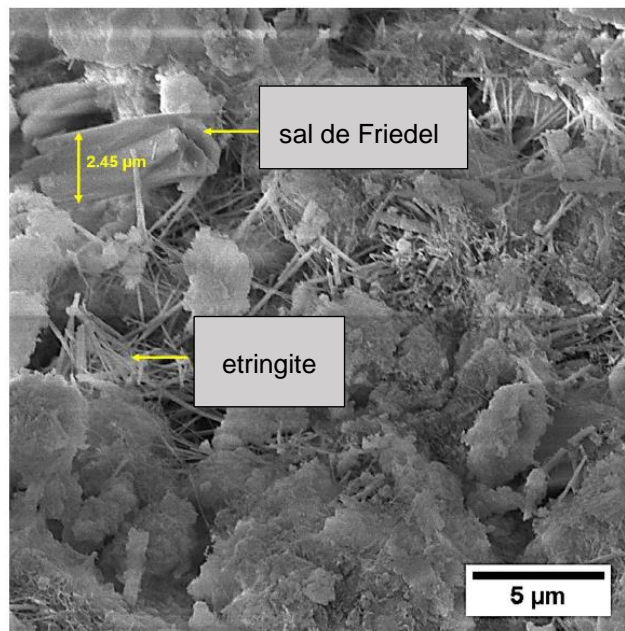


Figura 2.2 - Sal de Friedel e etringite existente no betão a 28 dias de idade (adaptado de Goyal e Karade, 2020)

Liu *et al.* (2017) estudaram o efeito das cinzas volantes (CV) na ligação dos cloretos e na difusividade dos Cl^- e concluíram que a incorporação de (CV) no betão aumenta a ligação do cloreto, uma vez que aumenta a quantidade de C_3A (aluminato tricálcico), fazendo crescer a taxa de formação do sal de Friedel. Conforme Li *et al.* (2015) e Parthasarathy *et al.* (2017) referiram, a formação de $Ca(OH)_2$ em idades iniciais é a causa da aceleração do processo de hidratação dos betões com água do mar. O $Ca(OH)_2$ é, portanto, consumido na fase inicial da hidratação, devido à alta atividade pozolânica da sílica coloidal (SC). A incorporação da SC otimiza as estruturas dos poros e leva a uma maior diminuição da porosidade total das pastas de cimento (Sikora *et al.*, 2020).

Otsuki *et al.* (2014), Neville (1995) e Kadam *et al.* (2014) concluíram que, quando as CV são adequadamente utilizadas em betão com água do mar na composição, reduz-se significativamente a difusividade de Cl^- e aumenta-se a resistividade do betão, reduzindo assim a taxa de corrosão.

De acordo com Liu *et al.* (2014 e 2017), a cura precoce pode resultar numa rápida difusividade dos Cl^- em betões com água do mar e baixo teor de CV. No entanto, a cura a longo prazo aumenta a resistência à migração dos cloretos, independentemente do teor de CV.

Dasar *et al.* (2020) concluíram que a água do mar influencia mais a atividade de corrosão do betão quando utilizada na cura do betão do que quando utilizada na sua composição. Os autores afirmaram também que a utilização de escória granulada de alto-forno oferece melhor resistência à corrosão em betões com utilização de água do mar (na cura ou na composição) do que o uso de OPC. Dasar *et al.* (2020) recomendam também o uso de barras revestidas com resina epóxida como reforço ao usar-se betão com água do mar na composição ou na cura do mesmo, salientando que as barras de aço

inoxidável são confiáveis para o reforço deste tipo de betão.

Por sua vez, Otsuki *et al.* (2011) recomendam o uso de cimento de escória de alto forno na composição para obter menor permeabilidade e baixas relações A/C como contramedidas à presença da água do mar. Nishida *et al.* (2015) afirmam que a escória de alto forno foi um dos aditivos mais eficazes para o betão com a água do mar na composição do ponto de vista da proteção contra a corrosão, que decorre do baixo efeito do oxigênio na matriz de cimento e da imobilização do Cl.

Li *et al.* (2019) referem que, utilizando superplastificante (SP) na composição dos betões, as propriedades do betão com água do mar na composição são semelhantes aos das respectivas propriedades do betão com água potável. A adição de mais SP melhora substancialmente a trabalhabilidade / fluidez, aumentando a resistência à compressão e a massa volúmica deste tipo de betão. No entanto, provoca uma redução da adesão dos betões, tanto com água do mar como com água potável.

2.4.1. Resistência à compressão

Griffin *et al.* (1963) afirmam que as primeiras pesquisas sobre o uso de água do mar na produção de betão surgiram em 1924, quando Abrams realizou uma série de experiências sobre o efeito da água do mar no betão e descobriu que o betão produzido com água do mar tinha uma resistência à compressão em cilindros de 28 dias 12 a 20% menor do que a verificada em betões correntes.

Gua *et al.* (2020), citando Etxeberria *et al.* (2016) e Kaushik *et al.* (1995), referem que a água do mar diminui o tempo de presa e afeta o aumento da resistência do betão. Teng *et al.* (2019) referem que o método de cura com água do mar também diminui ligeiramente a resistência à compressão. No entanto, afirmam também que as altas concentrações de íões de sal na água do mar geralmente levam a uma resistência inicial mais alta (a 7 dias, por exemplo).

Em 2019, Teng *et al.* concluíram que, em comparação com a cura com água potável, a cura com água do mar leva a reduções evidentes de resistência à compressão (até cerca de 15% a 90 dias) (Figura 2.3).

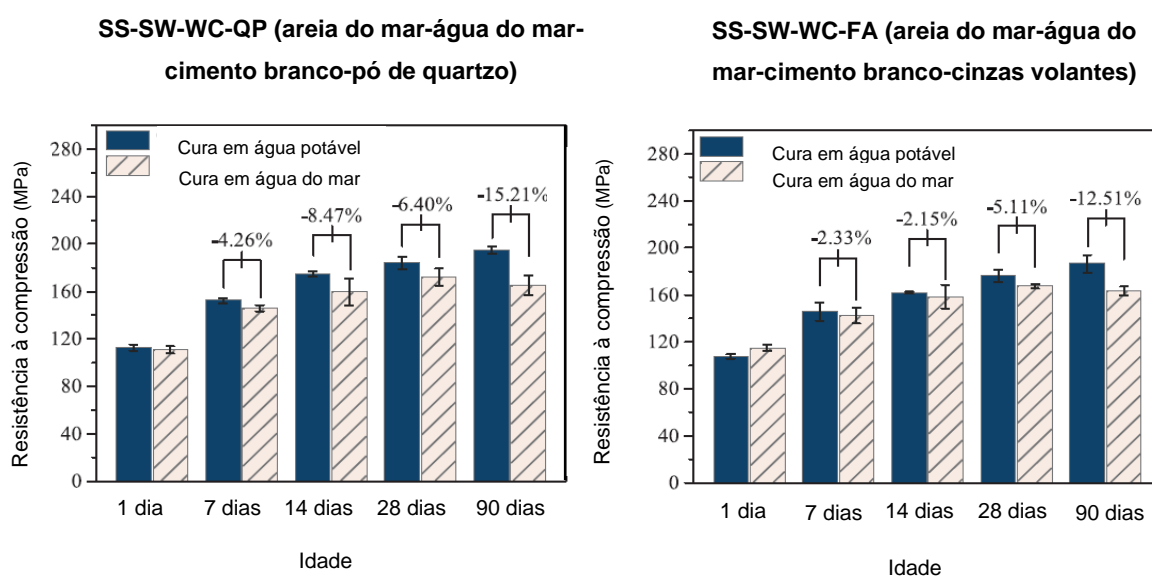


Figura 2.3 - Desenvolvimento da resistência tendo em conta o efeito da cura com água do mar (adaptado de Teng *et al.*, 2019)

Goyal e Karade (2020) afirmam que a resistência à compressão a 90 dias dos provetes com água do mar é cerca de 17,5% menor do que a sua resistência a 28 dias (Figura 2.4). Estas reduções na resistência em idade posterior são atribuídas à cristalização do sal da água do mar a longo prazo.

Regab *et al.* (2016) afirmam que isto acontece devido à existência do $MgSO_4$ quando a água do mar é usada para a cura.

Segundo Kaushil e Islam (1995) e Griffin (1963), a resistência à compressão diminui à medida que a razão da A/C aumenta, indicando que esse é o principal fator para a diminuição da resistência quando se utiliza água do mar no lugar da água potável. Os autores verificaram também que a resistência dos betões com água do mar aumenta à medida que a dosagem de SP aumenta, concluindo assim que o SP tem um efeito positivo na resistência do betão com água do mar na composição, tal como nos betões com água potável. Tal melhoria da resistência pode ser atribuída ao facto de a dispersão efetiva dos grãos de cimento causada pelo SP permitir uma mistura mais uniforme, completa e mais bem compactada (Lee *et al.*, 2013 e Baghabra *et al.*, 2004).

Nagabhushana *et al.* (2017) verificaram também que o aumento da resistência é mais lento em betões com água potável do que em betões com água do mar. Os autores concluíram igualmente que a resistência do betão com água do mar na composição e água potável na cura é superior à verificada no betão com água potável na composição e água do mar na cura.

Wegian (2010) verificou que houve um aumento da resistência à compressão a 7 dias para os betões com água do mar na composição e na cura e com água do mar só na cura, em comparação com o betão de referência (água potável na composição e na cura). A diminuição da resistência do betão com água do mar na composição e na cura a 91 dias e a longo prazo, é de 3,8 a 14,5%, respetivamente, quando comparada com os valores de resistência à compressão do betão de referência. O autor justifica este resultado devido à cristalização do sal que prejudica o aumento da resistência.

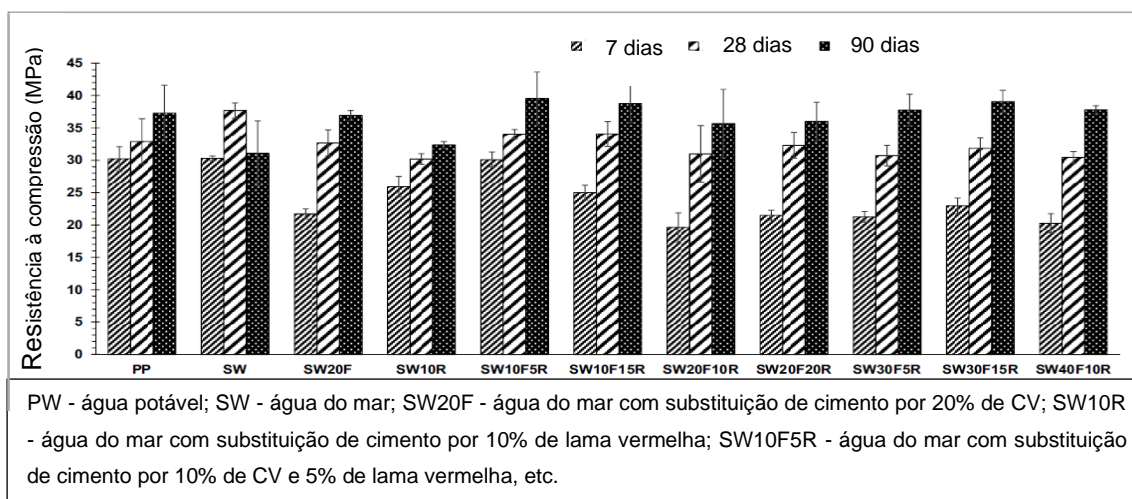


Figura 2.4 - Efeito da água do mar na resistência à compressão (adaptado de Goyal e Karade, 2020)

A Figura 2.5 e Figura 2.6 mostram claramente o efeito da água do mar na composição do betão, o efeito da cura com água do mar, assim como, o efeito mútuo da água do mar na composição e na cura, na resistência à compressão do betão.

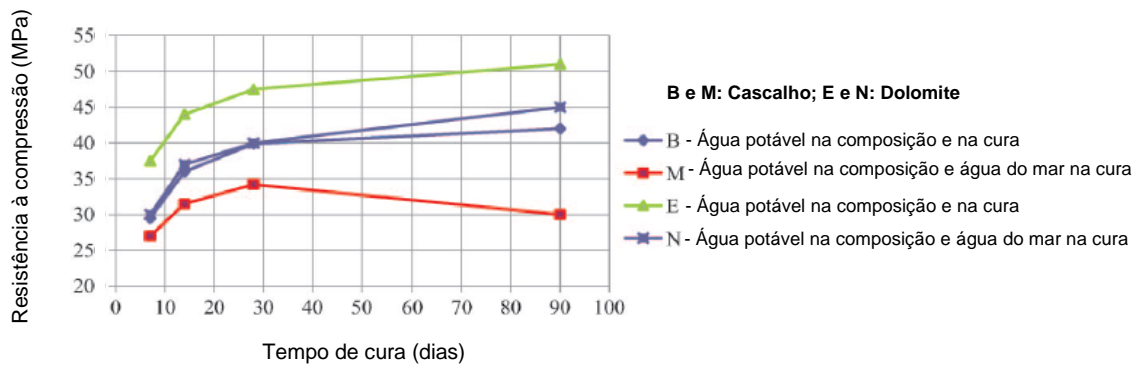


Figura 2.5 - Efeito da água potável na composição com a água potável / água do mar na cura para diferentes tipos de agregados (adaptado de Wegian, 2010)

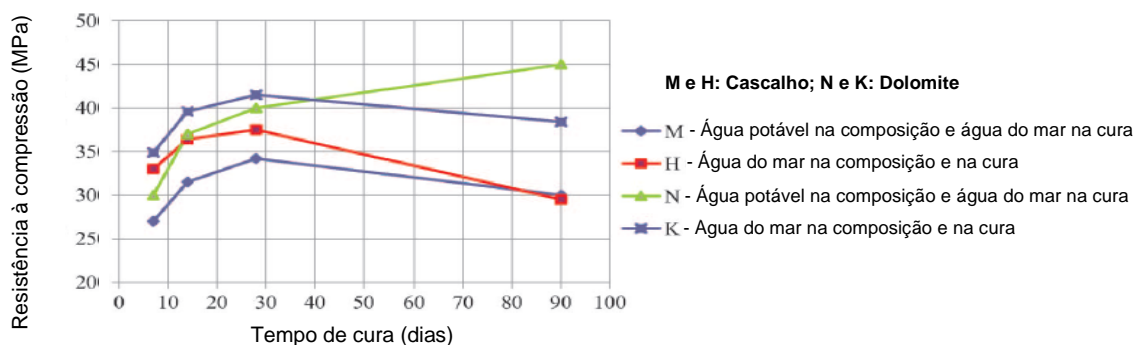


Figura 2.6 - Efeito da água potável / água do mar na composição com a água do mar na cura para diferentes tipos de agregados (adaptado de Wegian, 2010)

Assim, os autores concluíram que a cura do betão com água do mar aumenta a resistência à compressão inicialmente, mas que a água do mar tem um efeito negativo na resistência à compressão do betão em idades superiores a 28 dias. Wegian (2010) observou que um aumento no teor de cimento leva a um betão com maior resistência ao ataque devido à água do mar, pois um maior teor de cimento significa mais matriz de cimento exposta a sais da água do mar. De acordo com Zaher e Shihada (2003), o teor de cimento pode atenuar o efeito agressivo das baixas relações de A/C, dando mais trabalhabilidade à mistura, assim como aumentando a resistência de aderência entre os componentes do betão. Deste modo, a resistência contra todas as formas possíveis de deterioração é nitidamente melhorada com o uso de maiores teores de cimento. Por outro lado, de acordo com Shayan *et al.* (2010), a redução da resistência pode ser também compensada com baixas relações de A/C.

O estudo de Suryavanshi *et al.* (1996) descobriu que a combinação do produto de hidratação do cimento de SAC e dos Cl^- livres pode formar $Ca_4Al_2O_6Cl_2 \cdot 10H_2O$ e $Ca_2Al(OH)_6Cl \cdot 2H_2O$, o que diminui o teor de Cl^- livres e melhora a resistência do betão.

Katano *et al.* (2013) afirmam que, na presença de escória granulada de alto forno e CV, o uso de água do mar como água de composição do betão aumenta a resistência do mesmo até a 28 dias de idade. No entanto, este aumento da resistência não é significativo a 91 dias. De modo a melhorar ainda mais a resistência, é proposto o uso de nitrato de cálcio (NC) e sílica ativa (SA), que aumentam significativamente

a resistência inicial (7 dias) e aumentam moderadamente a resistência a longo prazo (91 dias) (Figura 2.7). Isto acontece provavelmente porque a adição de NC ao betão com água do mar provoca um aumento da concentração de hidróxido (OH^-) na solução dos poros, intensificando o estímulo alcalino da escória granulada de alto forno e das CV, acelerando assim a hidratação. Os autores referem que muitos cristais em formato de agulha (etringite) são formados nos poros do betão produzido com água do mar. Estes cristais preenchem os grandes vazios, densificando a microestrutura. A etringite também é logicamente formada no betão de referência. No entanto, o aumento da formação de etringite e de NC em betões com água do mar pode ser atribuído à reação química entre os iões de sulfato abundantes na água do mar e os componentes do ligante que contêm cálcio e alumínio.

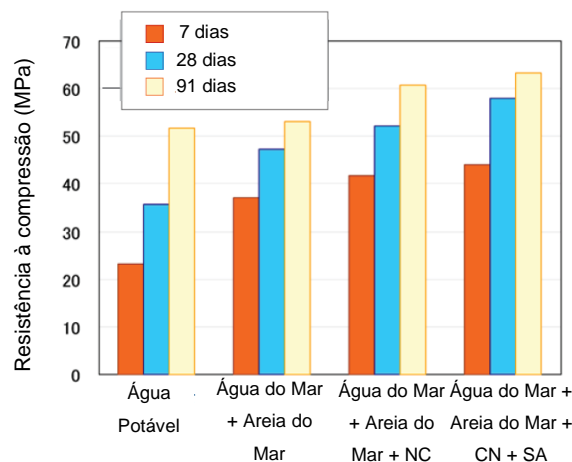


Figura 2.7 - Resistência à compressão a 7, 28 e 91 dias (adaptado de Katano *et al.*, 2013)

Segundo Thomas *et al.* (2012), Xu (1997) e Luo *et al.* (2003), a adição da água do mar aumenta a concentração de iões cloreto e sulfato, promovendo a formação do sal de Friedel e etringite, através da reação dos produtos de hidratação do C_3A com os iões Cl^- ou SO_4^{2-} da água do mar.

2.4.2. Resistência à tração

Younis *et al.* (2018) compararam duas misturas de betão, *Mix A*, betão com água potável, e *Mix B*, betão com água do mar. Com base na resistência à tração, os autores concluíram que o uso de água do mar leva a um ligeiro aumento inicial (até 7 dias) e depois a uma diminuição de aproximadamente 10% a 28 dias e em idades posteriores (Figura 2.8).

Por sua vez, a cura em água do mar leva a um ligeiro aumento na resistência à tração para ambas as misturas de betão em idades precoces. No entanto, a partir dos 28 dias de idade, a cura do betão com água do mar produz um ligeiro efeito negativo nas propriedades mecânicas da *Mix A*, sendo que o mesmo resultado não se observa na *Mix B*, sugerindo que o betão misturado com água do mar pode mostrar um bom desempenho em condições marinhas.

Wegian (2010) analisou diversas misturas de betão a 28 e 90 dias de idade e obteve os valores das resistências à tração apresentados no Quadro 2.2. Aí são também apresentados valores percentuais da tração a 90 dias, em relação àqueles que foram obtidos a 28 dias para as misturas de betão analisadas.

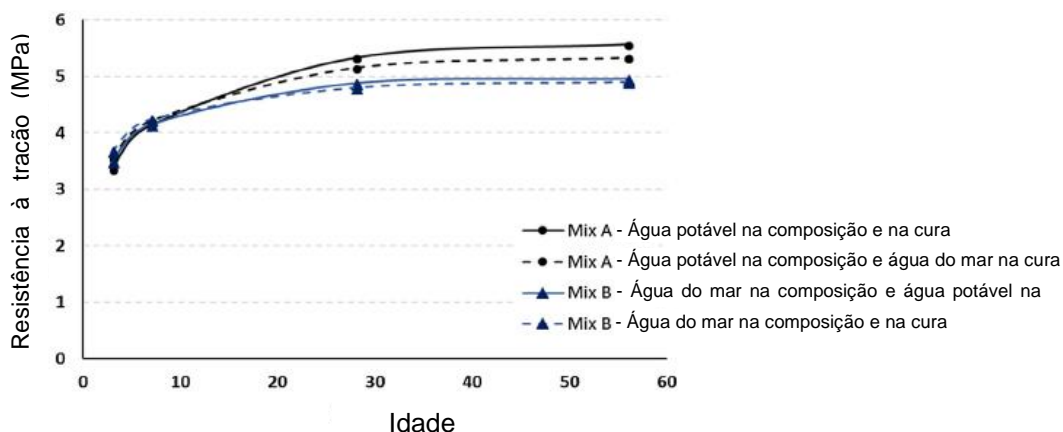


Figura 2.8 - Resistência à tração (adaptado de Younis *et al.*, 2018)

Quadro 2.2 - Resistência à tração (adaptado de Wegian, 2010)

Tipo de betão	Resistência à tração (MPa)		
	28 dias de idade	90 dias de idade	(90 dias / 28 dias) %
B (cascalho)	2,3	2,4	104
H (cascalho)	2,1	1,5	71
M (cascalho)	2,1	1,6	76

B - Água potável na composição e na cura; H - Água do mar na composição e na cura; M - Água potável na composição e água do mar na cura

2.4.3. Resistência à flexão

Etxeberria *et al.* (2016) afirmam que, no caso de escória de alto forno, os valores da resistência à flexão dos betões com a água do mar aumentaram em média 5% em comparação com os valores da resistência à flexão alcançados pelos betões com a água potável.

Wegian (2010) realizou o ensaio de resistência à flexão e obteve os resultados apresentados no Quadro 2.3, referente aos betões com 28 e 90 dias de idade.

Quadro 2.3 - Resistência à flexão (adaptado de Wegian, 2010)

Tipo de betão	Resistência à flexão (MPa)		
	28 dias de idade	90 dias de idade	90 dias / 28 dias %
B (cascalho)	5,3	6,1	115
H (cascalho)	4,8	4,4	92
M (cascalho)	4,1	3,2	78

B - Água potável na composição e na cura; H - Água do mar na composição e na cura; M - Água potável na composição e água do mar na cura

2.4.4. Módulo de elasticidade

Cui *et al.* (2014) realizaram o ensaio do módulo de elasticidade nos betões com água potável e água do mar e obtiveram seguintes resultados: 33 MPa com água potável e 30 MPa com água do mar. Concluindo que o módulo de elasticidade com água do mar diminui 9% em comparação com água potável. De acordo com Povindar *et al.* (1975) e Nishibayashi *et al.* (1980), isto deve-se aos Cl^-

presentes na água do mar, com a hidratação de cimento, o volume dos cristais de *NaCl* aumenta, resultando em fissuração interna no betão e levando à diminuição do módulo de elasticidade.

Teng *et al.* (2019) referem que a água do mar na composição ou na cura origina efeito negativo no módulo de elasticidade do betão, salientando que este efeito não é tão pronunciado quanto o efeito verificado na resistência (Figura 2.9).

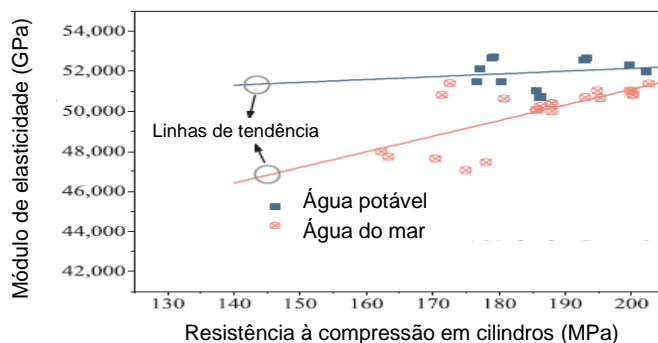


Figura 2.9 - Módulo de elasticidade em relação a resistência à compressão em cilindros (MPa) (adaptado de Teng *et al.* (2019))

2.5. Propriedades do betão com agregados grossos reciclados

Bravo *et al.* (2015) analisaram betões com AR de RCD provenientes de diversas centrais de reciclagem. Por exemplo, os autores verificaram que os AR da central de reciclagem Vimajas têm na sua constituição 75% de betão, argamassa e pedra natural, 12% de materiais cerâmicos e 11% de materiais betuminosos. Os autores afirmam que a origem dos AR influencia os resultados dos betões produzidos com estes AR uma vez que cada tipo de AR tem uma composição diferente. Esta diferença causa uma variação nas características dos agregados e posteriormente nas propriedades das misturas de betão resultantes.

Segundo Kumar (2017), a qualidade do betão feito com AR depende entre outros fatores da qualidade dos AR, da proporção de substituição dos AN, da quantidade de pasta de cimento aderida nos AR de betão, entre outros fatores. A redução no abaixamento (ensaio que avalia a trabalhabilidade) deve-se sobretudo à mudança na natureza da forma das partículas e na textura da superfície dos AR, em comparação com os AN.

Bravo *et al.* (2015) concluíram também que a forma e a composição dos diversos AR influenciam a trabalhabilidade das misturas, pois para manter o abaixamento foi necessário aumentar a relação A/C efetiva das misturas, à medida que se aumentava a taxa de substituição de AN por AR (Quadro 2.4).

Bravo *et al.* (2015) afirmam que a massa volúmica no estado fresco diminui à medida que a taxa de incorporação de AR aumenta, devido ao facto de a massa volúmica das partículas de AR ser menor do que a dos AN. De acordo com Silva *et al.* (2018), a massa volúmica do betão diminui em média 5 a 8% ao usar-se 100% de AR de RCD. Esta diminuição da massa volúmica do betão está relacionada com as propriedades físicas dos RCD, que possuem uma menor massa volúmica e uma maior absorção de água (Bravo *et al.*, 2015).

Quadro 2.4 - Abaixamento e relação A/C efetiva das misturas de betão (adaptado de Bravo *et al.*, 2015)

AR Vimajas	Taxa de substituição dos agregados (%)							
	10		25		50		100	
	Abaixamento (mm)	Relação A/C	Abaixamento (mm)	Relação a/c	Abaixamento (mm)	Relação a/c	Abaixamento (mm)	Relação A/C
	121	0,52	120	0,53	130	0,53	119	0,53

Segundo Etxeberria *et al.* (2016), quando os betões com AR são preparados utilizando aditivos minerais, as propriedades do betão produzido podem melhorar devido a dois possíveis mecanismos:

- i. parte dos aditivos minerais entra nos poros dos AR, o que posteriormente melhora a zona de transição interfacial (ZTI), ou seja, a ligação entre a pasta e os agregados;
- ii. fissuras originalmente presentes nos agregados são preenchidas por produtos de hidratação.

Segundo Silva *et al.* (2018), a substituição de AN por AR deve ser feita com base no seu peso e não no seu volume, influenciando assim a proporção agregado / cimento das misturas. A adição de AR irá proporcionar uma maior absorção de água, havendo necessidade em compensar com uma quantidade adicional de água. Uma boa manutenção de trabalhabilidade é uma propriedade desejada pois permite trabalhar o betão por longos períodos até que este endureça. Refira-se que, segundo os autores, a incorporação de AR normalmente não afeta o tempo de presa. Os autores concluíram que é necessário determinar quanta água é absorvida pelos AR num determinado período, por exemplo, durante o tempo decorrido entre a produção do betão na central de betão pronto e o local de construção onde o betão é aplicado. Para além deste aspeto, alguns AR podem ter angularidade e rugosidade de superfície consideráveis, o que pode resultar em maior atrito entre as partículas e, conseqüentemente, em menor trabalhabilidade. Nessas circunstâncias, para evitar a adição de água extra, o que aumentaria a relação A/C efetiva, o uso de aditivos redutores de água é uma abordagem eficaz para diminuir a necessidade de água de tais misturas e manter uma trabalhabilidade constante.

Pepe *et al.* (2014) verificaram que a água de compensação nos AR desempenha um papel significativo no processo de hidratação do cimento, influenciando o tempo de presa (atrasando-a). Deste modo, a maior absorção de água dos AR teve pouca influência no seu aumento do tempo de presa, em comparação com o betão com AN. Segundo Etxeberria *et al.* (2016), o tempo de presa do betão é superior nos betões com AR, pois estes agregados contêm uma quantidade maior de água absorvida do que os naturais.

Agrela *et al.* (2011) e Gonzalez-Corominas *et al.* (2014) afirmam que o uso de AR reduz significativamente a massa volúmica do betão endurecido. A massa volúmica seca parece ser mais sensível à quantidade de AR empregue, do que ao tipo de cimento ou à natureza da água utilizada (Etxeberria *et al.*, 2016).

Xu *et al.* (2018) afirma que trabalhabilidade das misturas de betão com AR diminui com a diminuição do tamanho máximo dos agregados grossos utilizados. Isso pode ser atribuído ao facto de os AR mais grossos absorverem menos água do que os AR mais finos.

2.5.1. Resistência à compressão

De acordo com Rahal e Alrefaei (2017 e 2018), o betão com AR de RCD é mais propenso a ter um desempenho de resistência inferior ao betão corrente, devido às características mecânicas dos RCD serem inferiores às dos AN, bem como à fraca ligação interfacial entre os RCD e a matriz de cimento.

Mas *et al.* (2012) e Martínez-Lage *et al.* (2012) afirmam que uma maior capacidade de absorção, bem como a presença de certas impurezas, têm uma influência negativa nas propriedades frescas e endurecidas dos betões. As propriedades mecânicas diminuem quando o nível de substituição dos AN por AR aumenta (Etxeberria *et al.*, 2016 e Bravo *et al.* 2015) (Quadro 2.5).

Quadro 2.5 - Resistência à compressão das misturas de betão com AR, em cubos, a 7, 28 e 56 dias (adaptado de Bravo *et al.*, 2015)

AR Vimajas	$f_{cm,7}$ (MPa)	$f_{cm,28}$ (MPa)	$f_{cm,56}$ (MPa)
BR	44,8 ± 1,2	53,9 ± 1,8	61,1 ± 1,6
B10G	42,6 ± 0,7	52,3 ± 1,7	56,7 ± 1,0
B25G	44,1 ± 0,9	54,1 ± 1,3	57,9 ± 2,8
B50G	38,1 ± 0,8	48,4 ± 0,9	49,5 ± 0,6
B100G	35,7 ± 0,2	42,0 ± 1,5	44,6 ± 0,5

De acordo com Younis *et al.* (2020), os betões com RCD têm uma resistência menor, comparada com a do betão de referência (com AN), devido ao aumento da porosidade, à menor resistência e massa volúmica dos RCD, assim como à fraca ligação interfacial entre os RCD e a matriz e / ou à presença de microfissuras e fissuras dentro dos RCD devido ao esmagamento e processos de reciclagem.

Um resumo sobre a influência da substituição de AN por AR na resistência à compressão em betões, obtida por diferentes estudos, é apresentado na Figura 2.10. A partir da figura, pode-se observar que a resistência à compressão geralmente diminui com o aumento da taxa de substituição de AR.

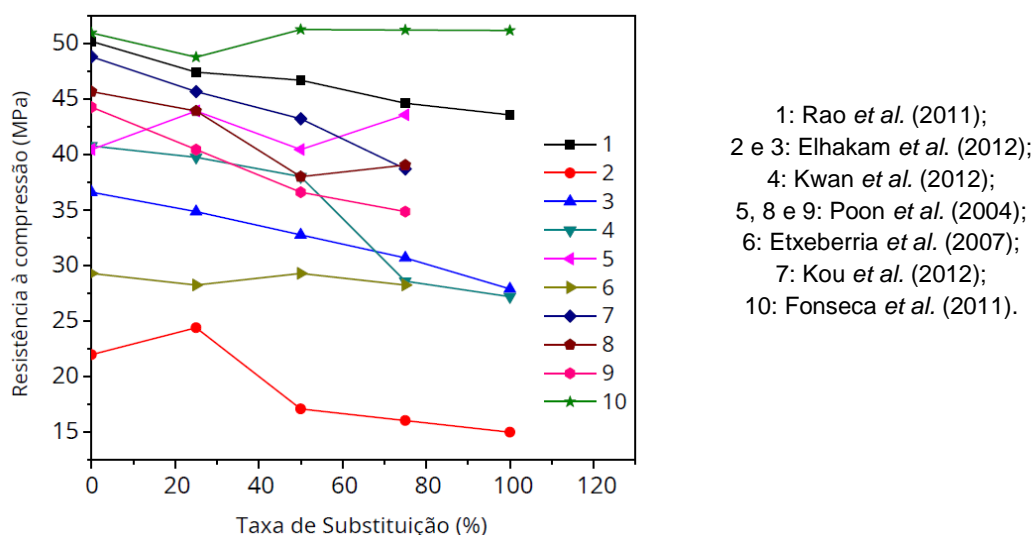


Figura 2.10 - Resistência à compressão de AR para diferentes estudos experimentais (Kisku *et al.*, 2017)

No Quadro 2.6, são apresentados os resultados obtidos por Etxeberria *et al.* (2016) na resistência à compressão a 7 e 28 dias de idade. É possível verificar que os betões NAC apresentam maior

resistência à compressão. Por sua vez, os betões produzidos com 100% de AR de RCD sofreram maior redução na resistência à compressão em relação aos betões NAC.

Os betões produzidos com 25% de AR de RCD apresentaram, em média, para cada série, uma resistência à compressão 12% menor após 7 dias, do que os betões com AN. O aumento da percentagem de AR para 50 e 100% provocou uma diminuição média de 22 e 42% na resistência à compressão, respetivamente. Betões produzidos com OPC apresentaram perdas de resistência à compressão a 28 dias de idade semelhantes às obtidas após 7 dias. No entanto, os betões produzidos com AR e escória de alto forno apresentam menor redução na resistência à compressão. A resistência à compressão após 28 dias de cura neste tipo de betão com 25, 50 e 100% de AR grossos reduziu-se em 6, 15 e 33%, respetivamente em relação ao betão NAC.

Quadro 2.6 - Resistência à compressão a 7 e 28 dias (adaptado de Etxeberria *et al.*, 2016)

Tipo de betão	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
NAC-1FW	52,4	61,5
RAC-25-1FW	44,1	49,5
RAC-50-1FW	39,6	48,8
RAC-100-1FW	26,5	32,8
NAC-3FW	45,4	57,5
RAC-25-3FW	38,6	53,6
RAC-50-3FW	35,4	49,5
RAC-100-3FW	29,4	40,5

NAC: betão com AN; RAC-%AR: betão com n% de AR; 1FW: OPC + água potável; 3FW: escória de alto forno + água potável.

Segundo Bravo *et al.* (2015), quanto maior for o teor de cerâmicos nos AR, maior será a perda de resistência à compressão. Os autores referem também que, quando existem partículas finas de argila nos AR de RCD, estas revestem os AR e absorvem a água de amassadura, obrigando a um aumento da relação A/C efetiva para se obter o mesmo abaixamento nas várias misturas. Por outro lado, a presença de argila nos RCD dificulta uma adequada ligação entre os AR e a pasta de cimento, enfraquecendo a estrutura interna do betão e causando um aumento da porosidade das misturas e uma diminuição da resistência à compressão.

Kumar (2017) justificou a redução da resistência à compressão em betões com AR de RCD com a presença de muitos micróporos e fissuras na argamassa junto aos AR e também com a presença de agregados pouco resistentes, como pedaços de tijolo.

2.5.2. Resistência à tração

De acordo com Ghorbani *et al.* (2019), a produção de betão com 25% de AR a 7 e 28 dias apresenta um efeito positivo na resistência à compressão e à tração, comparativamente com o betão com AN. Isto pode ser atribuído à menor relação de A/C efetiva do betão com 25% de AR, assim como à melhoria da microestrutura do betão devido ao uso de AR em substituição dos AN. No entanto, isto já não acontece para taxas de substituição maiores do que 25%.

Segundo Brito *et al* (2005), os AR, ao apresentarem uma superfície mais rugosa do que os AN, favorecem a resistência à tração do betão. Porém, este comportamento tende a piorar devido à maior absorção de água por parte dos AR e à necessidade de se aumentar a relação A/C com o aumento da taxa de substituição dos AN por AR, de modo a manter a mesma trabalhabilidade.

Kou *et al.* (2011 e 2013) relataram que o uso de CV em betões com AR teve um efeito negativo na resistência à tração. No entanto, após 1 ano, para taxas de substituição de 50 e 100% de AN por AR, os betões com AR e CV mostraram um aumento de 3,1 e 5,3% na resistência à tração, respetivamente, em comparação com os betões com AR sem CV.

De acordo com Mukharjee e Barai (2014), a adição de nano-sílica leva a um aumento da resistência à tração em até 14% nos betões com 100% de AR. Os autores atribuem este acréscimo à melhoria da ZTI entre os AR e a pasta de cimento.

A variação da resistência à tração com o aumento da taxa de substituição dos AN por AR obtida por vários autores é representada na Figura 2.11.

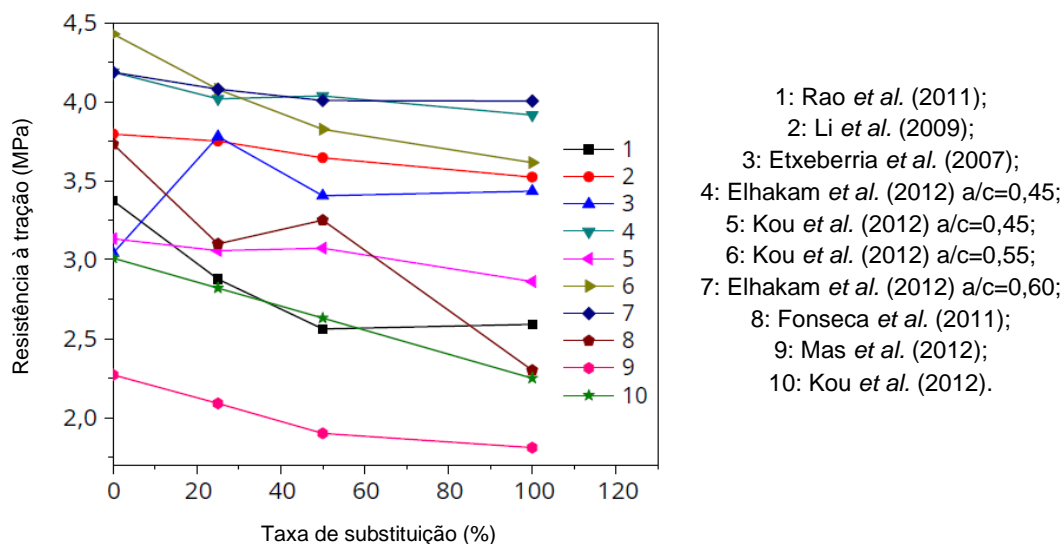


Figura 2.11 - Resistência à tração de AR para diferentes estudos experimentais (adaptado de Kisku *et al.*, 2017)

Bravo *et al.* (2015) concluíram que a resistência à tração é pouco afetada (decréscimo até 28%) com uso de AR de RCD no betão (Quadro 2.7). Gomes *et al.* (2009) destacam que esta diminuição aumenta significativamente com o uso de AR cerâmicos.

Quadro 2.7 - Resistência à tração por compressão diametral (adaptado de Bravo *et al.*, 2015)

AR Vimajas	Taxa de substituição dos agregados (%)				
	0	10	25	50	100
	Força de tração em cilindros (MPa)				
	4,0 ± 0,0	3,9 ± 0,1	3,8 ± 0,2	3,7 ± 0,3	2,9 ± 0,0

2.5.3. Resistência à flexão

Bairagi *et al.* (1993) verificaram que o betão feito com 25 e 50% de AR teve uma diminuição da resistência à flexão em torno de 6 a 13%, comparativamente ao betão corrente. Por sua vez, quando

se utilizou 100% de AR, a redução na resistência à flexão foi de 26%. Este resultado é atribuído à má qualidade da ligação interfacial desenvolvida entre a pasta de cimento antiga que cobre os AR e a nova pasta de cimento. Yang *et al.* (2008) afirmam que o uso de AR com menor capacidade de absorção de água leva a uma melhor resistência à flexão do betão.

Pelo contrário, segundo Neville (1995), os betões produzidos com AR apresentam uma resistência à flexão semelhante ou até superior à dos betões com AN (Quadro 2.8). A razão para esta resistência à flexão é o facto de estes agregados serem tipicamente mais alongados.

Quadro 2.8 - Resistência à flexão de betões com AR e água potável
(adaptado de Etxeberria *et al.*, 2016)

Tipo de betão	Resistência à flexão (MPa) - 28 dias
NAC-1FW	5,89
RAC-25-1FW	4,27
RAC-50-1FW	6,26
RAC-100-1FW	4,90
NAC-3FW	5,70
RAC-25-3FW	5,13
RAC-50-3FW	6,55
RAC-100-3FW	6,01

NAC: betão com AN; RAC-%AR: betão com n% de AR; 1FW: OPC + água potável; 3FW: escória de alto forno + água potável.

2.5.4. Módulo de elasticidade

Segundo Lydon e Balendran (1986), o módulo de elasticidade do betão é proporcional ao dos próprios agregados, que, por sua vez, depende da massa volúmica destes. O estudo do Etxeberria *et al.* (2016) revelou que o betão feito com AR tem menores valores de módulo de elasticidade. Os resultados dos ensaios mostraram que houve uma queda média do módulo de elasticidade de 11, 18 e 36%, respetivamente, quando as taxas de substituição foram de 25, 50 e 100%. Estes resultados estão de acordo com outras investigações realizadas. O resumo dos resultados obtidos por Etxeberria *et al.* (2016) está no Quadro 2.9.

Quadro 2.9 - Módulo de elasticidade de betões com AR (adaptado de Etxeberria *et al.*, 2016)

Tipo de betão	Módulo de elasticidade (GPa) - 28 dias
NAC-1FW	38,27
RAC-20-1FW	32,64
RAC-50-1FW	31,01
RAC-100-1FW	22,09
NAC-3FW	37,21
RAC-20-3FW	35,95
RAC-50-3FW	33,00
RAC-100-3FW	27,00

NAC: betão com AN; RAC-%AR: betão com n% de AR; 1FW: OPC + água potável; 3FW: escória de alto forno + água potável.

Kou *et al.* (2013) mostraram que o módulo de elasticidade diminuiu 12,6 e 25,2% com a substituição de 50 e 100% de AN por AR, respetivamente.

Segundo Corinaldesi e Moriconi (2009) e Pereira *et al.* (2012), a incorporação de SP leva ao aumento do módulo de elasticidade de betões com AR, uma vez permite a redução da relação A/C. A partir da Figura 2.12 é evidente que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da taxa de substituição de AN por AR. No entanto, pode-se notar também que, até uma taxa de substituição de 50%, a diminuição não é considerável e não cria impedimento para a utilização desses tipos de betões em estruturas habitacionais tradicionais.

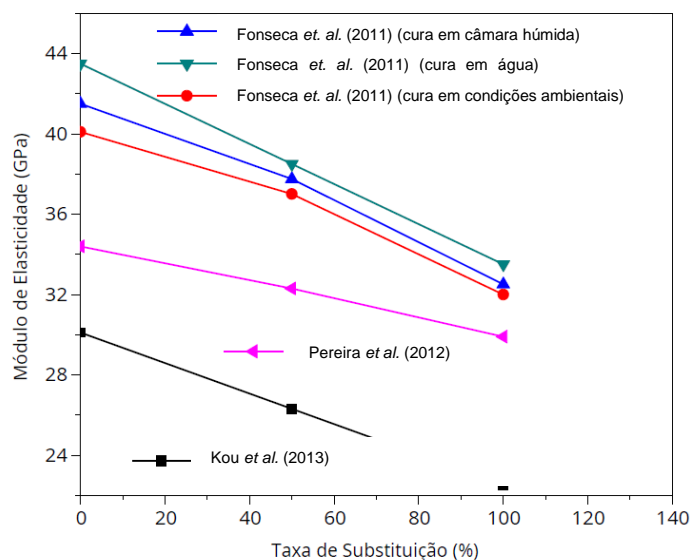


Figura 2.12 - Módulo de elasticidade de AR para diferentes estudos experimentais (adaptado de Kisku *et al.*, 2017)

Bravo *et al.* (2015) afirmam que a substituição de AN por AR reduz o módulo de elasticidade do betão (Quadro 2.10) e referem que o fator que mais influencia o módulo de elasticidade é a composição dos agregados. Gomes *et al.* (2009) referem que, quando os AR contêm material cerâmico, a perda no módulo de elasticidade é maior, devido à menor massa volúmica das partículas deste material.

Quadro 2.10 - Módulo de elasticidade (adaptado de Bravo *et al.*, 2015)

AR Vimajas	Taxa de substituição dos agregados (%)				
	0	10	25	50	100
	Módulo de elasticidade (GPa)				
	40,5 ± 0,2	40,8 ± 0,6	38,4 ± 0,2	34,8 ± 0,3	26,7 ± 0,4

2.5.5. Ultrassons

Kwan *et al.* (2012) afirmam que o ensaio dos ultrassons é usado para prever as características internas e a qualidade do betão. Os autores concluíram que os valores do ensaio de ultrassons aumentam com a idade dos provetes. No entanto, os valores diminuem à medida que o nível de substituição de AN por AR aumenta. Segundo os autores, a estrutura porosa do betão com AR pode ter impacte nos valores de ultrassons e na sua resistência, assim como a argamassa aderida dos AR de betão.

De acordo com a classificação sugerida por Malhotra (1976), os valores de ultrassons são considerados “bons” quando estão entre 3,66 e 4,58 km/s. Isto significa que, para estes valores, o betão não contém

grandes vazios ou fissuras, e mantém a sua integridade estrutural. Portanto, estando os betões com AR normalmente dentro deste intervalo, os AR são considerados adequados para substituir os AN em grandes percentagens desde que os betões produzidos atinjam a resistência alvo.

Na Figura 2.13, é possível verificar que, no estudo de Kwan *et al.* (2012), quando os AN são substituídos por 15% de AR, atinge-se o maior valor de ultrassom a 56 dias (4,38 km/s), enquanto o menor valor (4,11 km/s) é atingido com 80% de substituição de AN por AR.

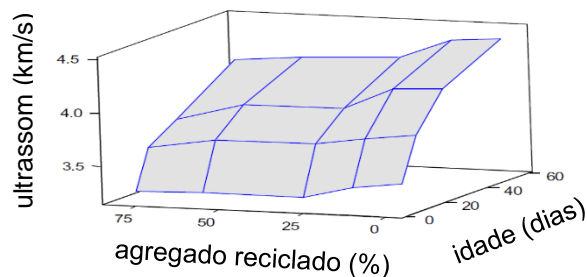


Figura 2.13 - Velocidade de ultrassom vs. AR vs. idade (adaptado de Kwan *et al.*, 2012)

2.5.6. Resistência à abrasão

Kumar (2017) afirma que o desgaste por abrasão pode ocorrer devido à fricção, raspagem, derrapagem ou deslizamento de objetos na superfície do betão. Esta forma de desgaste superficial é observada nos pavimentos, pisos ou outras superfícies nas quais as forças de atrito são aplicadas, devido ao movimento relativo entre a superfície e o tráfego em movimento. A resistência à abrasão do betão é influenciada por vários fatores, tais como resistência do betão, propriedades do agregado, acabamento superficial, cura, e outros fatores semelhantes. Deste modo, um pavimento deve possuir uma resistência à abrasão adequada para resistir ao desgaste da superfície devido ao tráfego em movimento. A perda da massa do betão ao longo do ensaio de desgaste à abrasão dá uma indicação sobre a sua resistência à abrasão. Um valor menor de perda por desgaste por abrasão indica uma maior resistência à abrasão do betão.

De Brito *et al.* (2005) avaliaram a resistência à abrasão de várias misturas de betão com AR de cerâmica de argila vermelha (AR grossos). De Brito *et al.* (2005) e Matias *et al.* (2013) concluíram que a perda de espessura por desgaste do betão diminuía à medida que a taxa de substituição de AN por AR grossos aumentava. De acordo com os autores, isto acontece devido a uma melhor ligação entre estes AR e a pasta cimentícia, pois a maior porosidade dos AR permite uma melhor penetração da pasta de cimento no interior deste tipo de agregados.

Segundo Bravo *et al.* (2015), a substituição total de AN grossos por AR provocou um aumento da resistência à abrasão em cerca de 15%. Os autores concluíram assim que a resistência à abrasão apresenta melhores resultados em betões com AR grossos (Quadro 2.11).

Kumar (2017), ao contrário de Bravo *et al.* (2015), afirma que a resistência à abrasão do betão com AR é menor do que a do betão com AN, devido à qualidade dos agregados e da ZTI entre a pasta de cimento e os AR. De acordo com Soares *et al.* (2014), uma vez que a pasta de cimento é mais

vulnerável ao desgaste do que os agregados, espera-se que as misturas de betão que apresentam melhor aderência entre a pasta de cimento e o agregado, apresentem um menor desgaste por abrasão.

Quadro 2.11 - Resistência à abrasão (medida em perda de massa) (adaptado de Bravo *et al.*, 2015)

Taxa de substituição dos agregados (%)	AR Grossos Valmor	AR Grossos Retria
	Perda de massa (%)	
0	7,6 ± 0,4	7,6 ± 0,4
10	7,2 ± 0,2	7,5 ± 0,5
25	6,7 ± 0,5	6,9 ± 0,4
50	6,6 ± 0,1	7,1 ± 0,3
100	6,3 ± 0,5	6,4 ± 0,9

2.6. Propriedades do betão com água do mar e agregados grossos reciclados

Nishida *et al.* (2015) e Rahal (2007) mostram alguns dos impactos negativos da água do mar e dos AR nas propriedades frescas e endurecidas do betão. Alguns exemplos incluem: redução na trabalhabilidade, na resistência e na sua durabilidade. Xiao *et al.* (2017) afirmam que estas desvantagens normalmente são atribuídas à presença de certos iões na água do mar e Shi *et al.* (2016) referem que o desempenho físico e mecânico é relativamente inferior nos RCD.

Segundo Younis *et al.* (2018), a utilização de água do mar na produção de betão não tem um efeito significativo na massa volúmica do betão fresco, sugerindo que a substituição do AN por AR reduz a massa volúmica do betão tanto nas misturas com água do mar como nos betões correntes.

Younis *et al.* (2020) indicam que o efeito combinado da utilização de água do mar e de AR de RCD resulta num tempo de presa inicial menor em aproximadamente 50%, em comparação com a utilização de água potável e AN.

Para mitigar as reduções no desempenho da trabalhabilidade, Etxeberria *et al.* (2016), Ferreira *et al.* (2011) e Poon *et al.* (2004) propõem utilizar AR pré-embecidos. Do mesmo modo, Matias *et al.* (2013) propõem que se utilize maiores quantidades de superplastificante.

Para melhorar o desempenho do betão misturado com água do mar e AR, Etxeberria *et al.* (2016) propõem o uso de escória, enquanto Shi *et al.* (2016), Singh e Singh (2018) e Zhang *et al.* (2015) propõem um tratamento de carbonatação dos RCD. Por fim, Borg *et al.* (2018) propõem a utilização de cinzas de combustível pulverizadas, SA e aditivos cristalinos.

A análise de custo do ciclo de vida realizada por Younis *et al.* (2018) mostrou que a incorporação de água do mar com AR, juntamente com varões de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), pode ser uma boa alternativa para a produção de um betão estrutural com melhor desempenho económico a longo prazo.

Segundo Etxeberria *et al.* (2016), o processo inicial de hidratação do betão produzido com escória de alto forno, água do mar e AR, nomeadamente o tempo de presa, é semelhante ao do betão de referência produzido com OPC, água potável e AN. O uso de AR aumenta a capacidade de absorção da água do betão, porém esta pode ser reduzida, no caso dos betões com água do mar, com o uso de escória de alto forno. A água do mar combinada com a escória de alto forno e com AR melhora

consideravelmente as propriedades mecânicas, sendo que o tipo de cimento é mais influente do que o tipo de água utilizado.

2.6.1. Resistência à compressão

Younis e Ebead (2020) investigaram três diferentes misturas de betão: a mistura de referência produzida com água potável e AN grossos (*Mix A*); mistura produzida com água do mar e AN (*Mix B*); mistura produzida com água do mar e AR grossos (*Mix C*). Foi adicionada água de compensação à mistura *Mix C*, para ter em conta a maior absorção de água dos AR. A utilização conjunta de água do mar e de AR resultou numa redução mais significativa na trabalhabilidade do betão. Li *et al.* (2019) afirmam que esta redução pode ser atribuída aos efeitos aceleradores induzidos pelos iões presentes na água do mar.

Ao substituir-se a água da composição, verificou-se um ligeiro aumento (de 3 a 5%) na resistência à compressão em idade precoce (ou seja, até 7 dias). Esta maior resistência inicial da mistura *Mix B* pode estar relacionada com o bloqueio dos poros através dos produtos de hidratação do cimento (Kaushik e Islam, 1995). No entanto, em idades posteriores (ou seja, 28 dias ou mais), o betão com água do mar apresentou uma resistência à compressão inferior à da mistura corrente, com uma diferença aproximada de 7 a 10% obtida a 56 dias. Embora dependa das condições específicas de cura, Kaushik e Islam (1995) sugeriram que a menor resistência a longo prazo do betão com água do mar pode ser atribuída à lixiviação dos produtos de hidratação.

Relativamente ao betão com água do mar e AR, verificou-se que a resistência à compressão deste betão a 56 dias foi aproximadamente 30% menor do que a mistura de referência. Assim, verificou-se que os efeitos negativos da utilização de água do mar e de AR de RCD foram sentidos simultaneamente na mistura e refletidos no seu desempenho. Os resultados desta investigação estão sintetizados na Figura 2.14 2.14.

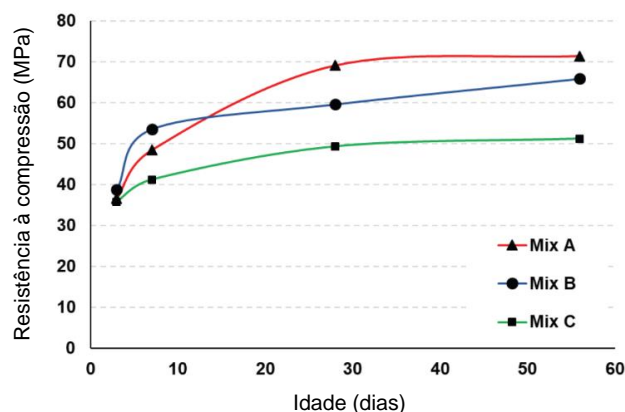


Figura 2.14 - Resistência à compressão de betões com AR (adaptado de Younis e Ebead, 2020)

Younis *et al.* (2020) afirmam que o uso exclusivo de água do mar provoca um ligeiro aumento (cerca de 5%) na resistência em idades precoces (até 7 dias), justificado com a diminuição da porosidade devida à aceleração da hidratação do cimento (Wang *et al.*, 2018). Pelo contrário, a 28 e a 56 dias, o betão com água do mar apresentou valores de resistência cerca de 8 a 10% menores do que o betão de referência (Younis *et al.*, 2020) (Figura 2.14). Segundo os autores, foram observados produtos cristalinos no betão misturado com água do mar, sugerindo que parte do cálcio na solução dos poros

reagiu com os íons sulfato (abundantes na água do mar), formando gesso. Younis *et al.* (2020) afirmam que a formação de gesso poderia produzir pressões de cristalização expansiva que resultassem numa diminuição da resistência do betão. Chegaram também à conclusão de que, na mistura *Mix A*, a resistência à compressão dos betões curados em água do mar é sempre maior em comparação à dos betões curados em água potável. Porém, na mistura *Mix C*, a resistência à compressão é menor nos betões curados em água do mar nas primeiras idades e tende a superar a partir de 56 dias os valores de resistência à compressão dos betões curados em água potável.

Younis *et al.* (2020) estudaram a influência de introduzir simultaneamente água do mar e AR em betão, tendo feito, em relação ao betão corrente, as seguintes alterações na mistura: uso de um retardador comercial; aumento de 40% da quantidade de superplastificante, em comparação com o betão de referência; redução da relação A/C de 0,34 para 0,31; aumento ligeiro do teor de cimento (aproximadamente 9%). Estas alterações melhoraram significativamente a trabalhabilidade, a resistência (Figura 2.15) e a permeabilidade da mistura com água do mar e AR, tendo atingido valores de resistência muito semelhantes aos obtidos pelo betão de referência. Matias *et al.* (2013) afirmaram que as melhorias das propriedades do betão fresco podem ser atribuídas principalmente ao uso de aditivos químicos, enquanto Marinkovic *et al.* (2010) referem que as melhorias das propriedades endurecidas se devem principalmente à redução da relação A/C.

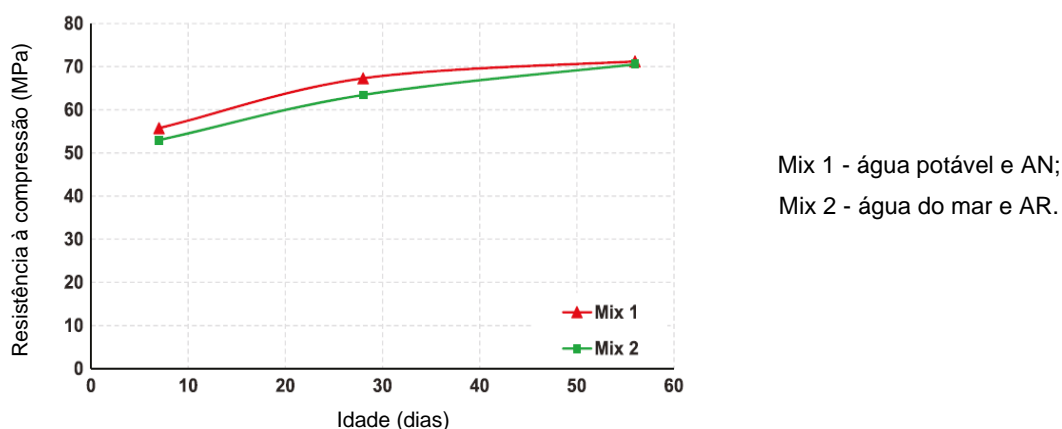


Figura 2.15 - Resistência à compressão com as alterações efetuadas (adaptado de Younis *et al.*, 2020)

Etxeberria *et al.* (2016) verificaram que os betões produzidos com água do mar obtiveram uma maior resistência à compressão do que os produzidos com água potável, tanto a 7 como a 28 dias. Isso aconteceu devido à matriz de cimento ser mais densa. Para além disso, analisando a Figura 2.16 a), verifica-se que os betões produzidos com 25% de AR apresentaram, em média, uma resistência à compressão 12% menor após 7 dias, do que os betões com AN. A utilização de AR em 50 e 100% originou, em média, 22 e 42% de perdas na resistência à compressão, respetivamente.

Os betões produzidos com escória de alto forno apresentaram menores reduções de resistência à compressão com a introdução de AR (Figura 2.16 b). A resistência à compressão a 28 dias dos betões produzidos com 25, 50 e 100% de AR grossos foi reduzida, em relação ao betão com AN, em 6, 15 e

33%, respetivamente. Estas reduções da resistência à compressão foram maiores relativamente aos estudos realizados por outros investigadores. Isto deve-se à elevada quantidade de partículas cerâmicas existente nos AR utilizados (Silva *et al.*, 2014).

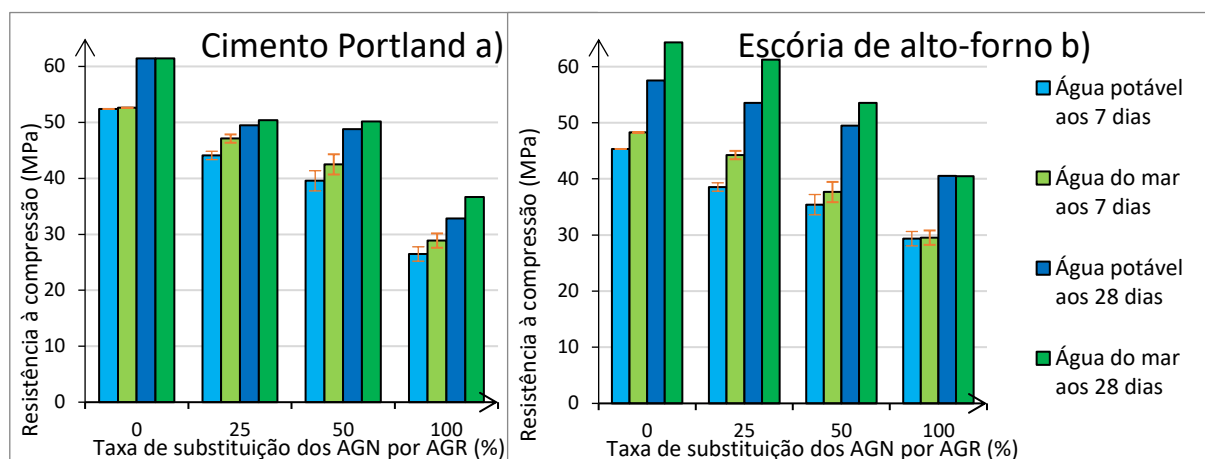
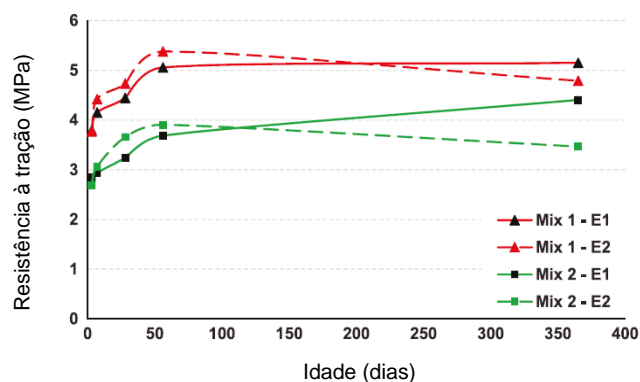


Figura 2.16 - Resistência à compressão com diferentes tipos de ligante aos 7 e 28 dias (adaptado de Etxeberria *et al.*, 2016)

2.6.2. Resistência à tração

De acordo com Younis *et al.* (2020), a cura com água do mar, apesar de aumentar a resistência à compressão do betão endurecido a longo prazo (até 1 ano), reduz a resistência à tração. A resistência à tração a 56 dias dos provetes curados em água do mar diminuiu 12 a 20%, comparativamente aos provetes curados em água potável (Figura 2.17).



Mix 1 - E1: Água potável e AN - cura por imersão na água potável durante 28 dias e posteriormente deixados ao ar livre em condições atmosféricas (E1);

Mix 1 - E2: Água potável e AN - cura por imersão em água do mar até ao dia dos ensaios (E2);

Mix 2 - E1: Água do mar e AR - E1;

Mix 2 - E2: Água do mar e AR - E2.

Figura 2.17 - Resistência à tração (adaptado de Younis *et al.*, 2020)

Analisando a figura, verifica-se que os betões produzidos em água do mar e AR de RCD e curados em água do mar apresentam uma resistência à tração superior em comparação aos betões curados em água potável. Porém, esta resistência à tração diminui a partir de 100 dias de idade.

2.6.3. Resistência à flexão

Etxeberria *et al.* (2016) verificaram, a partir do Quadro 2.12, que os betões produzidos com escória de alto forno e água do mar, alcançam uma maior resistência à flexão para todas taxas de substituição de AN por AR. Por outro lado, após 28 dias, os betões produzidos com escória de alto forno tiveram uma

resistência à flexão 18% superior à dos betões produzidos com OPC. Conclui-se assim que os valores à flexão melhoram significativamente com a introdução de escória de alto forno.

Quadro 2.12 - Resultados da resistência à flexão com a água do mar (adaptado de Etxeberria *et al.*, 2016)

Tipo de betão	Resistência à flexão (MPa) - 28 dias
NAC-1SW	5,09
RAC-20-1SW	4,40
RAC-50-1SW	6,53
RAC-100-1SW	5,10
NAC-3SW	6,03
RAC-20-3SW	5,45
RAC-50-3SW	6,66
RAC-100-3SW	6,42
NAC: betão com AN; RAC-%AR: betão com n% de AR; 1SW: OPC + água do mar; 3SW: escória de alto forno + água do mar.	

2.6.4. Módulo de elasticidade

Segundo Etxeberria *et al.* (2016), os betões produzidos com escória de alto forno e água do mar, com ou sem AR, originam maiores valores de módulo de elasticidade, em comparação com os betões com OPC, resultado de um maior desenvolvimento da hidratação da matriz de cimento (Quadro 2.13).

Quadro 2.13 - Resultados do módulo de elasticidade com a água do mar (adaptado de Etxeberria *et al.*, 2016)

Tipo de betão	Módulo de elasticidade (GPa) – 28 dias
NAC-1SW	40,16
RAC-20-1SW	34,56
RAC-50-1SW	31,26
RAC-100-1SW	24,54
NAC-3SW	42,28
RAC-20-3SW	37,56
RAC-50-3SW	34,45
RAC-100-3SW	27,38
NAC: betão com AN; RAC-%AR: betão com n% de AR; 1SW: OPC + água do mar; 3SW: escória de alto forno + água do mar.	

3. Descrição da campanha experimental

3.1. Introdução

Esta campanha experimental tem como objetivo principal analisar a utilização em betões da água do mar, tanto na composição e como na cura, em detrimento de água potável. Por outro lado, pretende-se avaliar o comportamento mecânico de betões produzidos com diferentes percentagens de substituição de agregados naturais (AN) grossos por agregados reciclados (AR) grossos (0, 50 e 100%). Estes betões são produzidos de modo a que os betões com AR tenham a mesma trabalhabilidade do que o betão de referência (BR).

A investigação em análise pode ser dividida em três fases experimentais. A primeira fase experimental diz respeito à preparação dos materiais necessários para a produção dos betões e à caracterização física dos agregados (naturais e reciclados) utilizados nos betões, realizando-se os seguintes ensaios: análise granulométrica, massa volúmica, baridade, absorção de água, desgaste de Los Angeles e análise composicional. Seguidamente, na segunda fase experimental, para caracterizar os betões no estado fresco, são realizados os ensaios de massa volúmica no estado fresco e de abaixamento do cone de Abrams. Por fim, a terceira fase experimental materializa-se pela realização dos ensaios no estado endurecido, nomeadamente a resistência à compressão, a velocidade de propagação dos ultrassons, a resistência à compressão em cilindros, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade e a resistência à abrasão.

Assim, esta campanha experimental visa analisar a viabilidade da substituição de água potável por água do mar em betões, bem como avaliar o efeito provocado pela substituição de AN por AR neste tipo de betões. A campanha experimental desta dissertação realizou-se em conjunto com a aluna Carolina Caracol, que estudou diversas características dos betões produzidos ao nível da durabilidade.

3.2. Planeamento da campanha experimental

Como referido, esta campanha experimental está subdividida em três fases, descritas em seguida.

A primeira fase consiste na preparação, determinação e caracterização de todo o material necessário para a produção dos betões, ou seja, na recolha e posterior peneiração dos AR, bem como na recolha da água do mar necessária para a composição e cura dos betões.

Para permitir determinar a composição ideal para os diversos betões, bem como para analisar os resultados obtidos depois nos ensaios aos betões, os agregados são sujeitos a diversos ensaios normalizados. Os ensaios efetuados, bem como as normas utilizadas, podem ser visualizados no Quadro 3.1.

Na segunda fase, para além de ser efetuada a produção dos betões, é avaliada e corrigida, se for o caso, a trabalhabilidade dos betões produzidos, garantindo assim uma fluidez apropriada do material e, ao mesmo tempo, evitando a segregação do material. Os betões devem ter uma trabalhabilidade idêntica para poderem ser comparados entre si. No Quadro 3.2, pode-se observar os ensaios realizados no estado fresco, bem como as normas seguidas na execução dos mesmos.

Quadro 3.1 - Ensaio e normas utilizados nos agregados

Ensaio	Norma(s)
Análise granulométrica	NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999)
Baridade	NP EN 1097-3 (2003)
Massa volúmica e absorção de água	NP EN 1097-6 (2003)
Desgaste de Los Angeles	LNEC E 237 (1970)
Análise composicional	NP EN 933-11 (2011)

Quadro 3.2 - Ensaio e normas utilizadas no estado fresco do betão

Ensaio	Norma(s)
Abaixamento do cone de Abrams	NP EN 12350-2 (2002)
Massa volúmica no estado fresco	NP EN 12350-6 (2002)

Na terceira e última fase, é avaliado o desempenho mecânico dos betões produzidos, através dos ensaios e normas sintetizados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Ensaio e normas utilizados no estado endurecido do betão

Ensaio	Idade (dias)	Forma e dimensão do provete (mm)	N.º provetes	Norma(s)
Resistência à compressão	7	Cúbica, 150	3	NP EN 12390-3 (2003)
	28		3	
	91		2	
Resistência à compressão em cilindros	28	Cilíndrica, 150 x 300	Nos provetes de módulo de elasticidade	NP EN 12390-3 (2003)
Ultrassons	7	Cúbica, 150	Nos provetes cúbicos da resistência à compressão	NP EN 12504-4 (2007)
	28			
	91			
Resistência à tração (por compressão diametral)	28	Cilíndrica, 150 x 300	2	NP EN 12390-6 (2003)
Módulo de elasticidade	28	Cilíndrica, 150 x 300	2	LNEC E 397 (1993)
Resistência à abrasão	91	Cúbica, 100	2	DIN 52108 (2010)

3.3. Materiais dos betões

Na indústria da construção, o betão é um material obtido através da moldagem e do endurecimento de uma mistura previamente selecionada e compactada, constituída por um ligante (cimento), juntamente com um conjunto de agregados finos e agregados grossos, água e, eventualmente, adições e/ou adjuvantes (superplastificantes).

- *Água potável e água do mar*

A água potável é utilizada na composição de metade dos betões produzidos. Esta água foi obtida através da rede pública de abastecimento. Por sua vez, a água do mar foi recolhida na zona costeira da Ericeira através de garrações de cinco e seis litros.

- *Agregados naturais finos e grossos*

Os agregados finos e os agregados grossos, equivalem às areias (finas e grossas) e às britas, respetivamente. A granulometria das areias varia entre 0-2 mm, no caso da areia fina, e 0-4 mm, no caso da areia grossa. Os agregados grossos, designados de Brita 1 e Brita 2, apresentam uma granulometria variada entre 9,5-19 mm e 19-22 mm, respetivamente.

- *Agregados reciclados grossos*

Os AR foram extraídos da central de reciclagem Vimajas, localizada em Pêro Pinheiro. Todos os agregados foram peneirados de acordo com as seguintes granulometrias: 4-5,6 mm; 5,6-8 mm; 8-11,2 mm; 11,2-16 mm e, por fim, 16-22,4 mm. Estes AR foram utilizados em alguns dos tipos de betão produzidos.

Para se obter mais informações sobre os diversos agregados, pode ser consultado o Capítulo 4.2.

- *Cimento*

O ligante utilizado nos betões foi produzido pela empresa “Secil” e denomina-se por CEM I 42,5 R. A sua ficha técnica está disponível para consulta no Anexo A1.

- *Superplastificante*

Para se conseguir obter a trabalhabilidade desejada em todos os betões produzidos, nomeadamente nos betões com água do mar, foi necessário recorrer à utilização do superplastificante (SP) da empresa “Sika”, denominado por SikaPlast-717. A sua ficha técnica está disponível para consulta no Anexo A2.

3.4. Composição e produção dos betões

3.4.1. Processo de determinação composicional

Com base na norma NP EN 206:2013+ A1 (2017), recorreu-se à curva de referência de Faury (Faury e Caquot, 1958) para formulação de todos os betões. O objetivo é que os betões produzidos tenham uma composição o mais idêntica possível à do betão de referência (BR), tendo a mesma trabalhabilidade, proporção de constituintes e curva granulométrica dos agregados, alterando-se apenas, quando necessário, a relação água/cimento (A/C). São de elevada importância as dosagens dos diferentes constituintes do betão, fazendo variar não só a resistência como também a parte económica e a sua durabilidade.

Como tal, o BR tem as seguintes características:

- classe de resistência: C 30/37 (44 MPa);
- classe de plasticidade: S3 (100 a 150 mm);
- classe de exposição ambiental: XC3 (moderadamente húmido);
- ligante: CEM I 42,5 R (SECIL);
- adjuvante: SikaPlast-717 (Sika);
- tipo de agregado: origem calcária;

- dimensão máxima do agregado: 22,4 mm;
- dosagem de cimento: 280 kg/m³ (mínimo recomendado por LNEC E 464);
- relação A/C: 0,55;
- água de composição: rede de abastecimento pública (potável);
- local de fabrico: Laboratório de Construção (LC), IST.

A curva de referência de Faury é constituída por duas retas, sendo que uma das retas tem em conta cimento e a outra não. O eixo de ordenadas corresponde à percentagem de material que passa em cada um dos peneiros e o eixo de abcissas corresponde à dimensão da abertura dos peneiros. Obtida a curva de Faury com cimento e sabendo o volume de cimento utilizado, em relação ao volume sólido total, é possível obter a curva de Faury sem cimento (Figura 3.1). A composição dos agregados é obtida através desta curva, de forma a obter-se um betão com a maior compacidade possível.

Ao intersectar a curva de referência de Faury (Figura 3.2) com as curvas granulométricas dos vários agregados, é possível obter as percentagens e respetivas quantidades de cada tipo de agregado (areia fina, areia grossa, brita 1 e brita 2). Quando os AN grossos são substituídos por AR grossos, é determinada a quantidade de cada dimensão granulométrica dos AR, igualando o obtido na curva de Faury sem cimento.

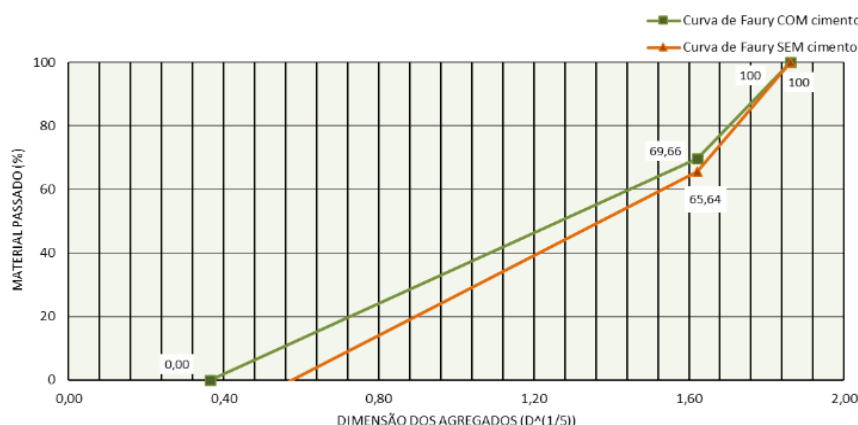


Figura 3.1 - Curvas de referência de Faury, com e sem cimento

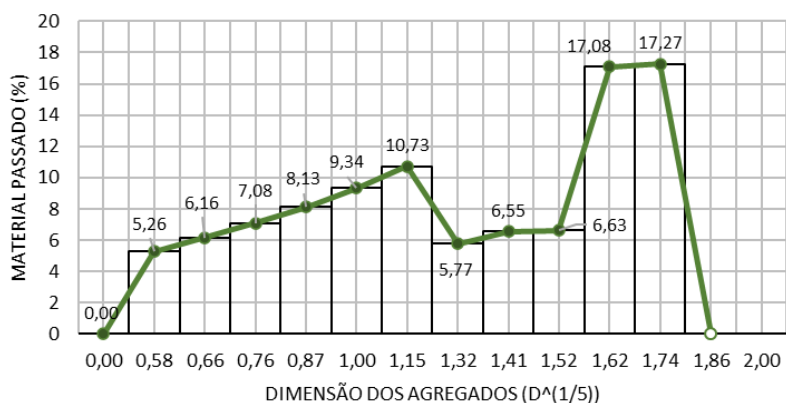


Figura 3.2 - Curva de referência de Faury

Para ser possível obter a mesma trabalhabilidade nos diversos betões, foi necessário alterar a relação de A/C nos betões com AR, provocando assim alterações composicionais nos betões com AR. No Quadro 3.4, pode-se visualizar a composição dos 8 betões produzidos com diferentes percentagens de AR.

Quadro 3.4 - Composição dos betões produzidos (kg/m³)

Tipo de betão	AN finos (kg/m ³)		AN grossos (kg/m ³)		AR grossos (kg/m ³)					SP (kg/m ³)	Quantidade de água efetiva (kg/m ³)
	Areia fina	Areia grossa	Brita 1	Brita 2	4-5,6 (mm)	5,6-8 (mm)	8-11,2 (mm)	11,2-16 (mm)	16-22,4 (mm)		
P-0	291	584	306	707						3	165
P-50			153	354	14	58	84	179	107		178
P-100					28	116	168	359	214		190
S-0	287	577	302	698							174
S-50			151	349	15	57	83	177	106		187
S-100					28	115	166	354	212		199

3.4.2. Composição do betão de referência

A partir da informação obtida, já é possível definir as quantidades dos diferentes componentes do BR (Quadro 3.4).

Quadro 3.5 - Composição do betão de referência

Cimento (kg/m ³)	Areia fina (kg/m ³)	Areia grossa (kg/m ³)	Brita 1 (kg/m ³)	Brita 2 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
300	291	584	306	707	165	3

3.4.3. Betões produzidos

O processo preliminar da betonagem decorreu de seguinte maneira:

- i. pesagem de todos os constituintes de betão;
- ii. lubrificação de todos os moldes com auxílio de óleo descofrante;
- iii. humedificação de todo o equipamento necessário (betoneira, cone de Abrams, etc.);
- iv. com auxílio de um cronómetro, início da betonagem, concluída após 10 minutos.

O processo da betonagem foi efetuado de seguinte maneira:

- i. assim que a contagem se inicia, foram adicionados todos os agregados grossos, juntamente com 1/3 da água total necessária para a betonagem, cobrindo deste modo os agregados;
- ii. ao fim de 4 minutos, foi introduzida na betoneira a quantidade de areia necessária para a realização da betonagem, com especial atenção para a execução de movimentos bruscos com a manivela da mesma, para uma melhor homogeneização da mistura;
- iii. ao oitavo minuto, foi adicionado o ligante, os 2/3 de água e o SP, efetuando novamente os mesmos movimentos bruscos do procedimento anterior.

Dada por concluída a betonagem, com o auxílio de um carrinho de mão e de uma colher de pedreiro, a mistura foi introduzida nos moldes. De seguida, passou por um processo de vibração, com recurso a uma agulha vibratória, nivelando a superfície exposta ao ar, com auxílio de uma espátula. Destaca-se a importância de colocar uma cobertura de plástico por cima dos moldes, para evitar a eventual evaporação de água. A desmoldagem foi efetuada após 24 horas.

O processo de cura dos betões ocorreu de uma forma diferente da habitual. Depois da desmoldagem, os provetes foram colocados dentro de um tanque com água potável ou água do mar, dependendo do tipo de cura. Estes permaneceram dentro de água por 30 minutos, tendo os provetes sido colocados em câmara seca após este tempo. Este processo foi repetido durante os 7 dias seguintes para todos os tipos de betão. A escolha deste processo pretendeu simular um eventual processo de cura por rega com água do mar.

No Quadro 3.5, pode-se observar a designação e a constituição dos 12 betões produzidos.

Quadro 3.6 - Constituição dos betões produzidos

Tipo de betão	Agregados reciclados grossos (%)	Água do mar na composição	Água do mar na cura	
P-CP-0 P-CP-50 P-CP-100	0 50 100	-	-	Betões sem água do mar
S-CP-0 S-CP-50 S-CP-100	0 50 100	✓	-	Betões com água do mar na composição
P-CS-0 P-CS-50 P-CS-100	0 50 100	-	✓	Betões com água do mar na cura
S-CS-0 S-CS-50 S-CS-100	0 50 100	✓	✓	Betões com água do mar na composição e na cura

3.5. Ensaio aos agregados

3.5.1. Análise granulométrica

O objetivo do ensaio consiste em descrever a geometria das partículas do agregado e traçar a sua curva granulométrica. Esta é utilizada de forma a estipular a quantidade de cada agregado inserida nos betões, bem como para a quantificação das diferentes frações das partículas constituintes de cada um dos tipos de agregados utilizados.

O ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999).

O procedimento do ensaio é o seguinte:

- i. a massa mínima da amostra é calculada segundo a NP EN 933-1, variando de acordo com a máxima dimensão do agregado ($D_{máx}$);
- ii. secar a amostra numa estufa ventilada, a uma temperatura de 110 ± 5 °C durante dois dias;

- iii. após este período, e após o devido arrefecimento da amostra, pesar a mesma numa balança de precisão de $\pm 0,1\%$, registando o valor como M_1 ;
- iv. proceder à lavagem da amostra de ensaio sobre um peneiro de 0,063 mm e outro peneiro de proteção de 1 ou 2 mm, até que a água se apresente límpida. Após este processo, colocar a amostra com dimensões superiores a 0,063 mm na estufa até atingir massa constante, ou seja, até que a variação da massa num intervalo de 1 hora seja inferior a 0,1%. Voltar a pesar a amostra e registar a massa obtida como M_2 ;
- v. montar uma coluna com os peneiros por ordem decrescente da dimensão das malhas pretendidas;
- vi. colocar a amostra no topo da coluna dos peneiros e agitar através da máquina de peneiração durante 1 minuto e meio;
- vii. desligar a máquina de peneiração e, de seguida, recolher os peneiros de cima da máquina e retirar os peneiros um de cada vez, de cima para baixo;
- viii. pesar o material retido em cada peneiro e registar os diferentes valores como R_i , sendo que i corresponde ao número do peneiro, da maior para a menor dimensão da malha;
- ix. pesar a massa do material retido no fundo da coluna e registar como P ;
- x. verificar se a diferença entre a soma das massas R_i e P e a massa M_2 é inferior a 1,0%. Em caso negativo, repetir o processo do ensaio.

A percentagem retida em cada peneiro é obtida através da seguinte expressão:

$$R_i(\%) = \frac{R_i}{M_1} \times 100 \quad \text{(Equação 3.1)}$$

Sendo que:

R_i - percentagem de material retido no peneiro i (%);

R_i - massa retida no peneiro i (g);

M_1 - massa total da amostra seca (g).

A obtenção destas percentagens para cada um dos agregados, permite elaborar a respetiva curva granulométrica.

A percentagem de finos que passa pelo peneiro de 0,063 mm é obtida através da seguinte expressão:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad \text{(Equação 3.2)}$$

Em que:

f - quantidade de finos que passa pelo peneiro de 0,063 mm (%);

M_1 - massa total da amostra seca (g);

M_2 - massa da amostra, após a lavagem e a secagem (g);

P - massa do material peneirado retida no fundo da coluna de peneiros (g).

3.5.2. Baridade

O objetivo de medir a baridade, também designada por massa volúmica aparente, é permitir uma perceção de algumas das principais características físicas dos agregados, como por exemplo, a capacidade resistente do betão. O ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 1097-3 (2000).

O procedimento do ensaio é o seguinte:

- i. preparar três amostras por cada tipo de agregado e secar em estufa ventilada a uma temperatura de 110 ± 5 °C, até atingirem massa constante;
- ii. verificar se a amostra reduzida após a sua secagem permite obter uma amostra de ensaio com uma massa compreendida entre 120 e 150% da massa necessária para encher o contentor cilíndrico em aço inoxidável;
- iii. depois da lavagem e da secagem, pesar o recipiente vazio numa balança de precisão de $\pm 0,1\%$ e registar o seu valor como M_1 ;
- iv. encher o recipiente numa superfície plana com auxílio de uma colher de pedreiro, com o cuidado de não compactar a amostra;
- v. proceder ao nivelamento da superfície com uma régua, de modo a aproximar o volume de agregados à capacidade do recipiente;
- vi. pesar o recipiente cheio e registar o valor como M_2 ;
- vii. repetir o processo para as restantes duas amostras de ensaio.

A baridade de cada amostra de ensaio é obtida através da seguinte expressão:

$$\rho_i = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \quad \text{(Equação 3.3)}$$

A baridade de cada agregado é determinada através da média das três amostras de ensaio:

$$\rho_{MVA} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}{3} \quad \text{(Equação 3.4)}$$

Em que:

ρ_{MVA} - massa volúmica aparente do agregado (kg/dm^3);

ρ_i - massa volúmica aparente da amostra de ensaio i (kg/dm^3);

M_1 - massa do recipiente de ensaio (kg);

M_2 - massa do recipiente com a amostra (kg);

V_r - capacidade do recipiente de ensaio (l).

3.5.3. Massa volúmica e absorção de água

O objetivo do ensaio consiste em definir de forma rigorosa as dosagens em massa dos diversos agregados, assim como identificar a quantidade de água que os agregados possam reter.

O ensaio permite determinar três massas volúmicas distintas: massa volúmica do material impermeável das partículas; massa volúmica das partículas secas em estufa e massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca.

Este ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 1097-6 (2003).

O procedimento do ensaio para os agregados grossos é o seguinte:

- i. peneirar a amostra de modo a remover as partículas inferiores a 4 mm e superiores a 22,4 mm;
- ii. compor a amostra de ensaio, de acordo com as percentagens conhecidas de cada granulometria;
- iii. imergir a amostra dentro de um recipiente de 5 l e agitar com cuidado de modo a retirar o ar presente na amostra;
- iv. deixar a amostra imobilizada durante um período de $24 \pm 0,5$ horas;
- v. voltar a encher o recipiente com água até este transbordar e agitar de modo a retirar o ar presente na amostra;
- vi. secar o exterior do recipiente, pesar numa balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar e registar a sua massa como M_2 ;
- vii. retirar os agregados do interior do recipiente, permitindo a secagem da superfície dos agregados sobre um pano absorvente;
- viii. voltar a encher o recipiente com água, secar o exterior, pesar e registar a sua massa como M_3 ;
- ix. verificar se o agregado apresenta um aspeto húmido, mas sem partículas visíveis de água;
- x. pesar a amostra saturada com a superfície seca e registar a sua massa como M_1 ;
- i. colocar a amostra num tabuleiro em estufa ventilada, à temperatura de 110 ± 5 °C até atingir massa constante;
- xi. pesar a amostra seca e registar a sua massa como M_4 .

O procedimento do ensaio para os agregados finos é o seguinte:

- i. pesar a amostra segundo a norma NP EN 1097-6 e lavá-la de modo a remover as partículas inferiores a 0,063 mm e superiores a 4 mm;
- ii. imergir a amostra dentro de um recipiente de 5 l e agitar com cuidado de modo a retirar o ar presente na amostra;
- iii. deixar a amostra imobilizada durante um período de $24 \pm 0,5$ horas;
- iv. voltar a encher o recipiente com água até este transbordar e agitar de modo a retirar o ar presente na amostra;
- v. secar o exterior do recipiente, pesar numa balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar e registar a sua massa como M_2 ;
- vi. decantar a maioria da água do provete e esvaziar a amostra sobre um tabuleiro;
- vii. voltar a encher o recipiente com água, secar o exterior, pesar e registar a sua massa como M_3 ;
- xii. remexer por várias vezes a amostra do tabuleiro, até que as partículas de água deixem de estar visíveis e que as partículas da amostra não adiram umas às outras;
- xiii. pesar a amostra saturada com a superfície seca e registar a sua massa como M_1 ;
- ii. colocar a amostra num tabuleiro em estufa ventilada, à temperatura de 110 ± 5 °C até atingir massa constante;
- xiv. pesar a amostra seca e registar a sua massa como M_4 .

As massas volúmicas do material impermeável das partículas, das partículas secas em estufa e das partículas saturadas com superfície seca são obtidas através das seguintes expressões, respetivamente:

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad \text{(Equação 3.5)}$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad \text{(Equação 3.6)}$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad \text{(Equação 3.7)}$$

Por fim, a absorção de água ao fim de 24 horas é obtida através da seguinte expressão:

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \quad \text{(Equação 3.8)}$$

Em que:

ρ_a - massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm^3);

ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm³);

ρ_{ssd} - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm³);

ρ_w - massa volúmica da água (kg/dm³);

WA_{24} - absorção de água ao fim de 24 horas (%);

M_1 - massa do agregado saturado com superfície seca;

M_2 - massa do recipiente contendo a amostra de agregado saturado e água (g);

M_3 - massa do recipiente contendo apenas água (g);

M_4 - massa da amostra seca em estufa (g).

Para concluir o ensaio, foi preciso determinar a quantidade de água adicional absorvida pelos AR no decorrer do processo de amassadura (10 minutos), estabelecendo assim um valor de compensação para a quantidade de água necessária para a absorção dos AR. Deste modo, os betões produzidos com a água de compensação têm igualmente uma trabalhabilidade semelhante à do BR.

O procedimento de determinação da água de compensação é o seguinte:

- i. pesar uma amostra de 2 kg numa balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- ii. submergir a amostra numa balança hidrostática e registar os valores regulares durante os primeiros 10 minutos. Passado este período, os valores são registados de 5 em 5 minutos até perfazerem 1 hora e posteriormente de 30 em 30 minutos ao longo de 24 horas (devido à sua variação ser mais reduzida).

A absorção de água num dado instante é obtida através da seguinte expressão:

$$w_i = \frac{m_i}{m_{24}} \times 100 \quad \text{(Equação 3. 9)}$$

Sendo que:

w_i - massa hidrostática registada no instante i (%);

m_i - massa hidrostática registada às 24 horas do ensaio (g);

m_{24} - absorção de água no instante i (g).

A quantidade de água de compensação a utilizar é obtida através da seguinte expressão:

$$M_{\text{compensação}} = M_{AR} \times (w_{10} \times WA_{24}) - Mh \quad \text{(Equação 3.10)}$$

Em que:

$M_{\text{compensação}}$ - quantidade de água a adicionar à mistura (g/dm³);

M_{AR} - massa de agregados reciclados grossos na composição em estudo (g/dm^3);

w_{10} - absorção de água a 10 minutos face à absorção a 24 horas (%);

WA_{24} - absorção de água a 24 horas (%);

Mh - quantidade de água presente na amostra devido à humidade (g/dm^3).

3.5.4. Desgaste de Los Angeles

O objetivo do ensaio é avaliar a perda de massa dos agregados por desgaste, quando sujeitos a um processo abrasivo, avaliando indiretamente a sua resistência mecânica. Deste modo, é possível prever a vulnerabilidade dos AN e AR à abrasão e ao choque. Também permite desenvolver uma relação entre os resultados do ensaio e as tensões de rotura de compressão e de flexão dos betões produzidos com estes agregados. O ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 1097-2 (2000).

O procedimento do ensaio é o seguinte:

- i. lavar e secar o agregado a ensaiar em estufa ventilada a uma temperatura de 110 ± 5 °C até atingir massa constante;
- ii. peneirar a amostra na máquina de peneiração, nas frações granulométricas especificadas na série ASTM, e ajustar o provete de ensaio à composição granulométrica que mais se aproxima da do agregado a ensaiar;
- iii. registar a massa do provete como M_1 , com auxílio de uma balança com precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- iv. constituir a carga abrasiva (6 a 12 esferas de aço, consoante a composição granulométrica do provete de ensaio);
- v. introduzir na máquina de *Los Angeles* o provete de ensaio e a carga abrasiva, com especial cuidado em distribuir uniformemente a carga abrasiva pelo comprimento do cilindro;
- vi. colocar a tampa na abertura e iniciar o funcionamento da máquina. O cilindro deve efetuar, à velocidade de 30 a 33 r.p.m., um número determinado de rotações em função da composição granulométrica em análise;
- vii. retirar o material do interior da câmara e proceder à peneiração do provete no peneiro de maior abertura, de modo a evitar a danificação do peneiro com malha de 1,68 mm que está por baixo;
- viii. lavar o material sobre o peneiro de malha de 1,68 mm e secar o provete em estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C até se atingir massa constante;
- ix. pesar o material e registar a sua massa como M_2 .

A perda por desgaste na máquina de Los Angeles é obtida através da seguinte expressão:

$$P_d = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{(Equação 3.11)}$$

Em que:

P_d - perda por desgaste na máquina de Los Angeles (%);

M_1 - massa do provete de ensaio (g);

M_2 - massa do material retido no peneiro de malha 1,6 mm (g).

3.5.5. Análise composicional

O objetivo da análise composicional é perceber qual a composição dos AR utilizados, ou seja, qual a percentagem de cada tipo de resíduo reciclado (betão, alvenaria, plástico, papel, cartão, vidro, etc.) existente nos resíduos recolhidos na central de reciclagem. Para isso, procedeu-se a uma análise visual de uma amostra de 2 kg.

3.6. Ensaio ao betão no estado fresco

3.6.1. Abaixamento do cone de Abrams

O objetivo do ensaio é permitir a determinação da consistência e da fluidez dos diferentes tipos de betões em estado fresco, avaliando deste modo, a sua trabalhabilidade. Em toda a campanha experimental, procurou-se manter uma trabalhabilidade idêntica em todos os betões produzidos, sendo que, sempre que foi necessário, a quantidade de água utilizada na composição dos betões (a relação A/C) foi ajustada. O abaixamento pretendido em todos os betões foi de 100-150 mm, pertencendo à classe de consistência S3. O ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2002).

O procedimento do ensaio é o seguinte:

- i. hidratar todo o material a utilizar;
- ii. colocar a placa metálica num local plano e horizontal e, de seguida, colocar o molde metálico em forma cónica com 30 cm de altura (aberto nas duas extremidades) e um funil no topo;
- iii. pressionar com os pés as duas abas junto à base do molde metálico e, com auxílio de uma colher de pedreiro, encher o molde com uma mistura em 3 camadas, cada uma com aproximadamente 1/3 da altura do molde; seguidamente, com o varão de compactação, dar 25 pancadas da periferia ao centro do molde;
- iv. retirar o excesso do topo com uma espátula e, de seguida, com um movimento vertical efetuado num intervalo entre 4 a 6 segundos, retirar o molde;
- v. medir e registar a diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto da mistura, após o abaixamento.

De acordo com a norma referida, se após a extração do molde a mistura se mantiver intacta e simétrica,

o ensaio é validado; caso contrário, deve-se repetir o procedimento.

3.6.2. Massa volúmica no estado fresco

O objetivo do ensaio é servir de parâmetro de controlo entre os vários betões produzidos, sendo que, utilizando as mesmas quantidades de agregado e ligantes, quanto menor for a massa volúmica do betão no estado fresco, pior será a sua resistência mecânica e a durabilidade no estado endurecido. O ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 12350-6 (2002).

O procedimento efetuado é o seguinte:

- i. pesar o recipiente metálico cilíndrico com capacidade de 10 litros numa balança de precisão $\pm 0,1\%$ da massa a determinar e registar a sua massa como M_1 ;
- ii. encher o recipiente com o betão fresco, recorrendo ao auxílio de uma colher de pedreiro;
- iii. vibrar a mistura com uma agulha vibratória (sem tocar no recipiente), com especial cuidado, para atingir uma boa compactação do betão;
- iv. nivelar a superfície com uma espátula de pedreiro e limpar o exterior do recipiente;
- v. voltar a pesar o recipiente cheio e registar a sua massa como M_2 .

A massa volúmica é obtida através da seguinte expressão:

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad \text{(Equação 3.12)}$$

Em que:

D - massa volúmica do betão em estado fresco (kg/m^3);

M_2 - massa do recipiente com o betão fresco (kg);

M_1 - massa do recipiente vazio (kg);

V - volume do recipiente (m^3).

3.7. Ensaaios ao betão no estado endurecido

Todos os provetes de betão ensaiados foram sujeitos previamente a uma cura diária de 30 minutos durante 7 dias. Após passarem por este processo de cura, os provetes foram mantidos em câmara seca até poderem ser ensaiados.

3.7.1. Resistência à compressão

O objetivo do ensaio é determinar a capacidade de resistência dos vários betões sob tensão uniforme de compressão. Este ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011).

Neste ensaio, foram utilizados três cubos de 15 cm de aresta e, posteriormente, dois cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura.

Aferiu-se a resistência à compressão em cubos a 7, 28 e 91 dias. Antes da realização deste ensaio, os provetes foram pesados e sujeitos a um outro ensaio (velocidade de propagação dos ultrassons), explicado posteriormente.

O procedimento realizado nos provetes cúbicos consistiu em centrar o provete na prensa, alinhando os cantos às marcas do prato inferior, com especial cuidado em posicionar o provete lateralmente, de forma a que a parte que recebeu o enchimento não ficasse em contato com os pratos.

A resistência à compressão é obtida através da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{(Equação 3.13)}$$

Onde:

f_c - resistência à compressão do provete (MPa);

F - carga máxima (N);

A_c - área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm²).

A resistência à compressão em cilindros foi avaliada apenas a 28 dias, reaproveitando os provetes do módulo de elasticidade (ensaio não destrutivo explicado posteriormente). Os dois provetes foram centrados na vertical, com superfícies previamente retificadas. A resistência à compressão é obtida de modo idêntico à dos cubos.

3.7.2. Resistência à tração

O objetivo do ensaio é determinar a resistência à tração por compressão diametral do betão e consiste em submeter o provete cilíndrico a uma carga distribuída ao longo da sua geratriz. Dá-se deste modo a rotura do provete por tração. O ensaio realizou-se a 28 dias, de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2011). Para cada tipo de betão, foram utilizados dois provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. O material adicional a este ensaio é uma peça em aço com duas faixas de cartão prensado nas geratrizes da base e do topo, sobrepondo a peça de carga na segunda geratriz para aplicação da carga.

A resistência à tração por compressão diametral é obtida através da seguinte expressão:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad \text{(Equação 3.14)}$$

Em que:

f_{ct} - resistência à tração por compressão diametral do provete (MPa);

F - carga máxima (N);

L - comprimento da linha de contacto do provete (mm);

d - resistência da seção transversal (mm).

A resistência à tração por compressão diametral é dada pela média aritmética dos dois provetes.

3.7.3. Módulo de elasticidade

O objetivo do ensaio é determinar a deformabilidade que o betão possui através do declive da reta que passa no patamar em regime elástico da curva tensão-extensão de um betão. O ensaio realizou-se de acordo com a norma LNEC E 397 (1993). Os provetes foram previamente retificados, de modo a que, quando fossem posicionados na prensa hidráulica, ficassem com a superfície lisa e paralela.

Para iniciar o ensaio, foi necessário determinar qual a carga máxima a aplicar ao longo do ensaio. Para estimar este valor, que corresponde a uma resistência à compressão em cilindros, foi preciso recorrer a um cálculo auxiliar, utilizando a resistência à compressão em cubos obtida anteriormente. A expressão em questão é a seguinte:

$$\overline{f_{cil}} = \overline{f_c} \times 0,8 \times \frac{1}{3} \quad \text{(Equação 3.15)}$$

Onde:

$\overline{f_c}$ - resistência média à compressão do provete cubico (MPa);

$\overline{f_{cil}}$ - resistência média à compressão do provete cilíndrico (MPa).

O procedimento realizado consistiu em aplicar dois extensómetros, diametralmente opostos, no provete. Aplica-se inicialmente uma tensão de 0,5 a 1,0 MPa, que é aumentada de forma contínua até atingir $\frac{1}{3}$ da tensão média da resistência à compressão do betão ensaiado. É preciso ter em atenção que a diferença entre os dois extensómetros no final de cada ciclo de carga tem de ser inferior a 10%. Caso isto não se verifique, volta-se a realizar o ciclo de carga até cumprir esta condição.

O módulo de elasticidade é obtido através da seguinte expressão:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f,n} - \sigma_{i,n}}{\varepsilon_{f,n} - \varepsilon_{i,n}} \times 10^{-3} \quad \text{(Equação 3.16)}$$

em que:

E_c - módulo de elasticidade em compressão (GPa);

$\sigma_{i,n}$ - tensão inicial aplicada no ciclo n (MPa);

$\sigma_{f,n}$ - tensão máxima aplicada no ciclo n (MPa);

$\varepsilon_{i,n}$ - extensão para a tensão $\sigma_{i,n}$, registada no ciclo n ;

$\varepsilon_{f,n}$ - extensão para a tensão $\sigma_{f,n}$, registada no ciclo n .

3.7.4. Ultrassons

O objetivo do ensaio não destrutivo é determinar, de forma indireta, a qualidade e a homogeneidade existente nos diferentes tipos de betões, avaliando também a quantidade de vazios existente. Para tal, o ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 12504-4 (2007). Este ensaio pode ser realizado de forma indireta, direta ou semidirecta. Nesta investigação, optou-se pelo método direto, que é descrito da seguinte forma:

- após a calibração do equipamento, posicionar o emissor e o recetor de modo centrado e alinhado nas faces laterais opostas do provete a ensaiar (a face de enchimento encontra-se no topo). Repetir este processo noutra par de faces opostas. Registrar, deste modo, três valores por par.

A velocidade de propagação das ondas é obtida através do quociente entre o comprimento que o impulso longitudinal ultrassónico percorre e o tempo de propagação entre as duas extremidades dos transdutores.

Os provetes utilizados neste ensaio são os da resistência à compressão em cubos.

3.7.5. Resistência à abrasão

O objetivo do ensaio é caracterizar a resistência à abrasão do provete por desgaste. Este ensaio é importante em materiais a utilizar, por exemplo, como pavimentos, revestimentos e canais hidráulicos. O ensaio realizou-se de acordo com a norma DIN 52108 (2010).

Neste ensaio, foram utilizados os seguintes equipamentos e utensílios: máquina de abrasão de Böhme; pó abrasivo; estufa ventilada à temperatura de 50 ± 5 °C; balança com precisão $\pm 0,1$ g; paquímetro e um aspirador para limpeza da máquina de abrasão e dos provetes.

Os dois provetes cúbicos de cada tipo de betão (com 100 mm de aresta) tiveram de ser previamente cortados para ficarem com as dimensões pretendidas para o ensaio (Figura 3.3).

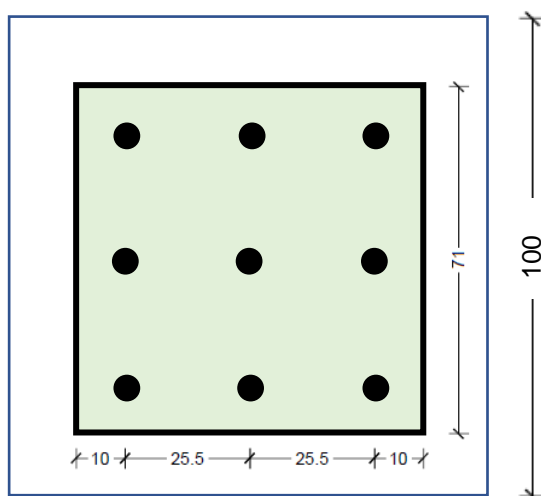


Figura 3.3 - Corte e distribuição dos pontos de referência (mm)

Pretende-se que os provetes referidos sejam paralelepípedos, de base quadrada, com $71 \pm 1,5$ mm de

aresta e $50 \pm 1,5$ mm de altura.

Os provetes, depois de serem cortados, são postos em estufa ventilada a uma temperatura de 50 ± 5 °C, até atingirem massa constante.

O procedimento do ensaio é o seguinte:

- i. após os provetes atingirem massa constante, retirar os provetes da estufa e esperar que estes arrefeçam;
- ii. marcar os 9 pontos de referência na face oposta à do teste, conforme a Figura 3.3;
- iii. com auxílio do paquímetro, medir a espessura inicial do provete em cada um dos pontos de referência e pesar o provete;
- iv. pesar 20 g de pó abrasivo em 16 recipientes;
- v. limpar a superfície da máquina de abrasão e distribuir uniformemente 20 g de pó abrasivo pelo trilho de abrasão;
- vi. posicionar o provete no mecanismo de fixação e aplicar no centro da sua face de topo um carregamento vertical de $30 \pm 0,3$ kPa, garantindo assim atrito suficiente entre o provete, o disco rotativo e o pó abrasivo;
- vii. iniciar a rotação do disco de Böhme até completar 22 voltas, correspondente a um ciclo de teste, sendo que o ensaio à abrasão é constituído por 16 ciclos de teste;
- viii. entre cada ciclo de teste, limpar o provete e o disco e distribuir novamente os 20 g do pó abrasivo;
- ix. pesar o provete desgastado e voltar a medir a espessura dos 9 pontos de referência.

A resistência à abrasão por desgaste é obtida através da redução de altura / espessura nos pontos de referência de cada provete, dada pela seguinte expressão:

$$\Delta l = \frac{\sum_{j=1}^n (l_{i,j} - l_{f,j})}{n} \quad \text{(Equação 3.17)}$$

Em que:

Δl - perda de espessura média (mm);

$l_{i,j}$ - espessura inicial do provete j (mm);

$l_{f,j}$ - espessura final do provete j (mm);

n - número de pontos de referência.

A resistência à abrasão é obtida pela média aritmética dos dois provetes, de cada tipo de betão.

4. Análise e discussão dos resultados

4.1. Introdução

Este capítulo encontra-se subdividido em três partes, nas quais estão descritos e analisados os resultados obtidos durante a campanha experimental. A primeira parte consiste na apresentação e na análise dos resultados obtidos nas diferentes propriedades dos agregados usados na produção dos betões. A segunda e a terceira apresentam e analisam os resultados obtidos relativamente às propriedades do betão no estado fresco e no estado endurecido, ao nível da resistência mecânica, respetivamente.

4.2 Propriedades dos agregados

Neste subcapítulo, são analisados os resultados obtidos nos seguintes ensaios: análise granulométrica, baridade, massa volúmica e absorção de água, desgaste de *Los Angeles* e análise composicional. Estes ensaios têm como principal objetivo caracterizar os agregados utilizados na presente dissertação (areia fina, areia grossa, brita 1, brita 2 e agregados reciclados).

4.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados realizou-se segundo a norma NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999). Esta análise afeta a compacidade da mistura que, por sua vez, influencia não só a trabalhabilidade, mas também a resistência mecânica.

De forma a produzir betões idênticos, os agregados foram peneirados e separados pelas diversas frações granulométricas. Após a realização da análise granulométrica, foi obtida a Figura 4.1.

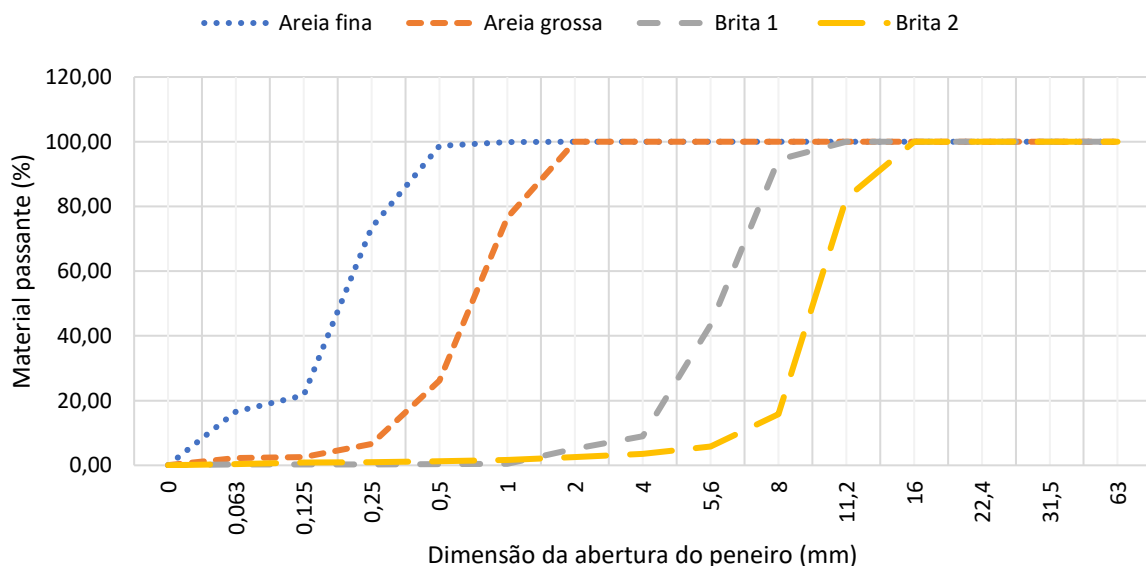


Figura 4.1 - Análise granulométrica dos diferentes agregados utilizados

Através da figura, é possível verificar que os AN possuem uma granulometria uniforme, ou seja, uma granulometria concentrada. Comparando as curvas granulométricas obtidas com as fornecidas pelas empresas distribuidoras dos agregados, elas são muito similares. Deste modo, é possível concluir que o ensaio decorreu de forma adequada (Anexo C1).

4.2.2. Baridade

A baridade, também conhecida por massa volúmica aparente, varia com o grau de compactação, com a curva granulométrica e a forma dos agregados. Esta foi medida segundo a norma NP EN 1097-3 (2000).

As areias finas e grossas têm uma granulometria mais contínua. Assim, estas apresentam uma baridade maior, como se pode observar no Quadro 4.1. Este resultado deve-se igualmente à sua maior massa volúmica, comparativamente aos AR. Por sua vez, os AR grossos apresentam uma maior variedade na geometria das partículas, possuindo maior porosidade, maior volume de vazios e apresentando, conseqüentemente, uma baridade inferior à medida para os AN. Este resultado pode ser uma avaliação indireta de que o desempenho do betão com AR será inferior ao do betão com AN.

Quadro 4.1 - Baridade dos agregados naturais e reciclados

Agregados	Areia fina	Areia grossa	Brita 1	Brita 2	AR
Baridade (kg/m ³)	1530	1540	1350	1360	1261

4.2.3. Massa volúmica e absorção de água

O ensaio da massa volúmica e da absorção de água realizou-se segundo a norma NP EN 1097-6 (2003). A massa volúmica é essencial para a determinação correta das dosagens em massa dos agregados. De igual modo, a absorção de água é uma propriedade muito importante, pois, quando esta aumenta, pode alterar consideravelmente a relação A/C dos betões produzidos e prejudicar as suas propriedades no estado fresco e endurecido, devido à maior porosidade do betão.

O ensaio da massa volúmica permitiu a determinação de três tipos de massa volúmica distintas: massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca (ρ_{ssd}), massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) e massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a). De entre estas massas volúmicas, a mais relevante para transformar as dosagens em volume dos agregados para valores em massa correspondentes é a ρ_{ssd} , uma vez que esta permite a produção de betão com agregados saturados, impedindo a absorção da água destinada às reações de hidratação do cimento.

No Quadro 4.2, pode-se observar os valores obtidos para as diferentes variáveis. Os AR, ao contrário dos AN grossos, apresentam uma menor massa volúmica e uma maior absorção de água. Isto deve-se à alta porosidade de AR cerâmicos existentes nos AR e da argamassa aderida nos AR de betão. Comparando os valores obtidos no quadro com valores referidos nas fichas técnicas dos Anexo A3 e A4, existem algumas diferenças, mas isto não influencia o desempenho previsto dos agregados por serem residuais.

Quadro 4.2 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados

Agregados	Areia fina	Areia grossa	Brita 1	Brita 2	AR
ρ_a (kg/m ³)	2603,9	2626,3	2697,4	2704,5	2635,4
ρ_{rd} (kg/m ³)	2583,2	2581,4	2609,3	2599,4	2274,3
ρ_{ssd} (kg/m ³)	2591,2	2598,5	2641,9	2638,3	2411,3
Absorção de água (%)	0,3	0,7	1,3	1,5	6,0

Quanto à absorção de água ao longo de 24 horas, é possível verificar através da Figura 4.2 que esta ocorre de forma não linear durante os primeiros cinco minutos. Estes resultados estão de acordo com as investigações mencionadas no subcapítulo 2.3.

Importa destacar que a absorção de água a 10 minutos dos AR correspondeu a 84,9% da absorção de água determinada no ensaio de absorção de água às 24 horas, o que significa que a 10 minutos os AR possuem uma absorção de água de 5,1%. A absorção de água a 10 minutos é bastante importante, pois permite determinar a quantidade de água absorvida pelos AR durante a betonagem. Sabendo este valor, é possível colocar esta quantidade de água extra (água de compensação), de modo a que os AR não absorvam a água destinada às reações de hidratação do cimento.

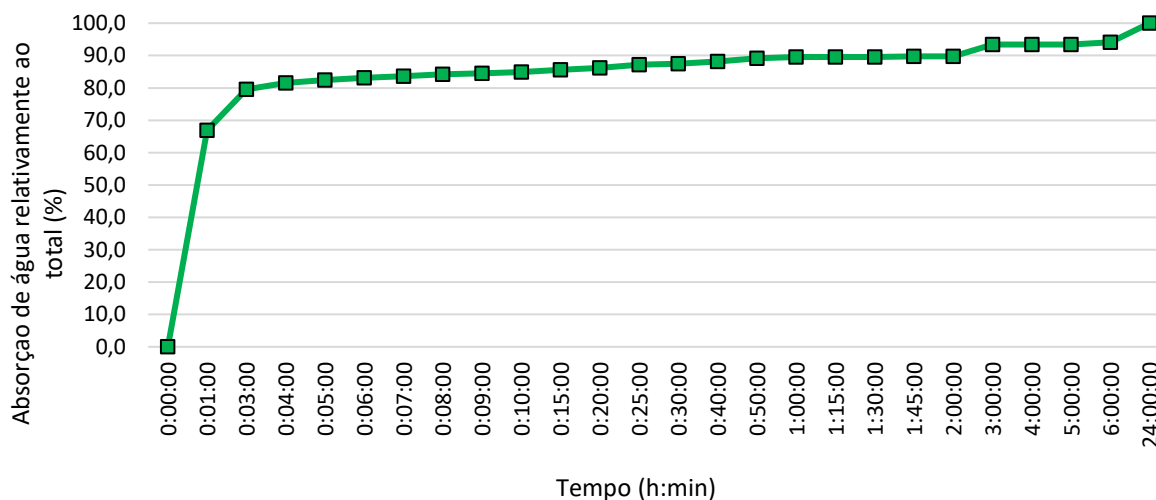


Figura 4.2 - Evolução da absorção de água de AR

Os valores intermédios podem ser consultados no Anexo C2 e C3.

4.2.4. Desgaste de *Los Angeles*

O ensaio do desgaste de *Los Angeles* é realizado segundo a norma NP EN 1097-2 (2000), apenas aos agregados grossos (brita 1, brita 2 e AR).

Os valores obtidos são apresentados no Quadro 4.3. Nesta dissertação, os AR apresentam um maior nível de fragmentação face aos AN, possivelmente devido à sua constituição (betão, argamassa, pedra natural, alvenaria, vidro, materiais betuminosos, entre outros materiais), principalmente à menor capacidade resistente da argamassa aderida aos AR de betão. No que se refere aos AN, verifica-se um desgaste superior a 25%.

Quadro 4.3 - Resistência ao desgaste de *Los Angeles* dos agregados grossos

Agregados	Brita 1	Brita 2	AR
Desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)	26,5	27,8	46,0

4.2.5. Análise composicional

A análise composicional é realizada através de uma análise visual dos AR. Existe uma grande heterogeneidade e variedade na composição dos AR, tal como se pode observar na Figura 4.3.

É possível verificar que “betão, argamassa, pedra natural” e “alvenaria - materiais argilosos” correspondem à maioria dos RCD analisados, o mesmo foi verificado em 2.3 na grande maioria dos estudos (Anexo C4).

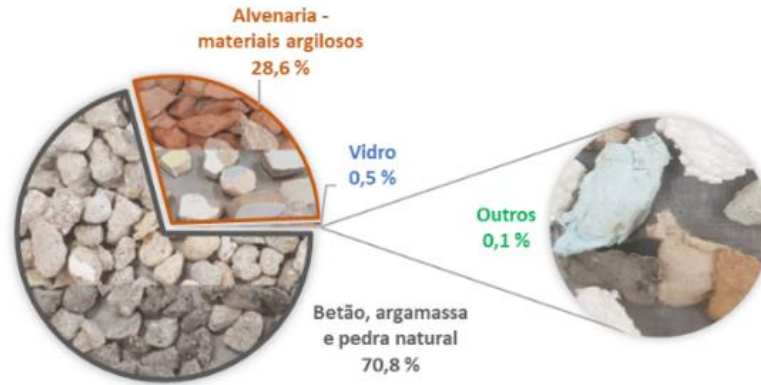


Figura 4.3 - Composição dos RCD oriundos da central de reciclagem Vimajas

4.2.6. Síntese

Depois da realização dos ensaios às propriedades dos agregados, é possível retirar algumas conclusões. Ao contrário dos AN, os AR apresentam menor baridade e massa volúmica. Este facto deve-se à natureza porosa de alguns AR, tais como o tijolo, o azulejo, entre outros materiais argilosos presentes nos AR. Em relação à absorção de água por parte dos AR, esta é mais elevada em comparação aos AN, também devido à maior porosidade dos AR. Por último, a resistência à fragmentação dos AR é menor, em comparação à dos AN, devido ao facto de a argamassa aderida a estes ter uma menor resistência ao desgaste.

4.3. Propriedades do betão no estado fresco

Neste subcapítulo, são descritos e analisados os resultados dos ensaios realizados aos betões no estado fresco, ou seja, antes da presa e endurecimento.

4.3.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do betão está diretamente relacionada com o desempenho do betão no estado endurecido. Esta propriedade é bastante afetada pela incorporação de água do mar e de AR. Isto deve-se ao facto de os betões com substituição total de água potável por água do mar e com substituição parcial/total de AN por AR necessitarem de uma maior quantidade de água para obter a mesma trabalhabilidade de betões com apenas água potável e AN.

Para colmatar esta situação, é necessário aumentar a relação água / cimento (A/C) nos betões produzidas com AR e/ou água do mar, de modo a manter a mesma trabalhabilidade.

O abaixamento pretendido em todos os betões foi de 100-150 mm, pertencendo à classe de consistência S3. De modo a controlar a trabalhabilidade dos betões produzidos, foi realizado, segundo a norma NP EN 12350-2 (2002), o ensaio de abaixamento do cone de Abrams. No Quadro 4.4, pode-se observar os valores de abaixamento do cone de Abrams e a relação A/C dos vários betões produzidos.

Como a trabalhabilidade de todos os betões produzidos nesta dissertação foi semelhante (100 a 150 mm), considera-se que estes podem ser comparáveis entre si. Este facto é atribuído ao uso de aditivos químicos (superplastificantes) que melhoram as propriedades do betão fresco (Matias *et al.*, 2013) e também ao ajuste da relação A/C.

Quadro 4.4 - Abaixamento do cone de Abrams (mm)

Tipo de betão	P-0	P-50	P-100	S-0	S-50	S-100
Abaixamento (mm)	150	119	110	115	120	105
Relação A/C total	0,55	0,59	0,63	0,58	0,62	0,66
Relação A/C efetiva	0,55	0,55	0,55	0,58	0,58	0,58

Comparando os diferentes betões produzidos, foi necessária uma maior quantidade de água nos betões com água do mar e/ou AR. Por outro lado, a quantidade de água necessária aumenta à medida que a percentagem de AR aumenta. A combinação de água do mar e de AR provocou uma redução mais significativa na trabalhabilidade do betão, tal como é constatado no Quadro 4.4. Esta redução deve-se aos efeitos aceleradores induzidos pelos iões presentes na água do mar (Li *et al.*, 2019).

No entanto, refira-se que a maior relação A/C total se deve à maior absorção de água dos AR. Analisando os valores da relação A/C efetiva, ou seja, sem se considerar a água de compensação adicionada aos AR, verifica-se que a relação A/C efetiva dos betões não se altera com a introdução dos AR. Isto significa que, ao adicionar-se AR, para se manter a trabalhabilidade dos vários betões, não foi necessário alterar a relação A/C efetiva.

4.3.2. Massa volúmica

A massa volúmica é uma propriedade importante do betão no estado fresco, onde o grau de compactação e os agregados existentes no betão condicionam o valor desta. A determinação da massa volúmica foi realizada segundo a norma NP EN 12350-6 (2002). No Quadro 4.5, são apresentados os valores deste ensaio para os diferentes tipos de betões produzidos, bem como a respetiva variação relativamente ao betão de referência (BR). Assim, verifica-se que com a utilização de 100% de AR grossos de RCD com água potável, se obteve, no máximo, uma diminuição de 6,4%. No entanto, com a utilização de 100% de AR grossos de RCD com água do mar, obteve-se uma diminuição máxima de 6,9%.

Quadro 4.5 - Massa volúmica no estado fresco (kg/m³)

Tipo de betão	P-0	P-50	P-100	S-0	S-50	S-100
Massa volúmica (kg/m ³)	2334,9	2282,1	2184,7	2285,5	2267,6	2173,2
Desvio-padrão	10,6	1,9	2,4	28,0	12,5	10,0
Variação (%)	-	-2,3	-6,4	-2,1	-2,9	-6,9

As massas volúmicas presentes no quadro variam entre 2170 e 2340 kg/m³. Estes valores são bastante semelhantes, demonstrando que a diferença se pode dever apenas às diferentes massas volúmicas dos AN e dos AR. Através da Figura 4.4, verifica-se que, à medida que a taxa de substituição de AN grossos por AR grossos do betão aumenta, a massa volúmica do betão no estado fresco diminui. Isto ocorre de uma forma praticamente linear, como é comprovado pelos elevados valores obtidos para os coeficientes de determinação (R²) das regressões lineares efetuadas. Os elevados valores de R² eram previsíveis, pois, como referido, a variação da massa volúmica depende da alteração da massa volúmica dos agregados utilizados na produção de betões.

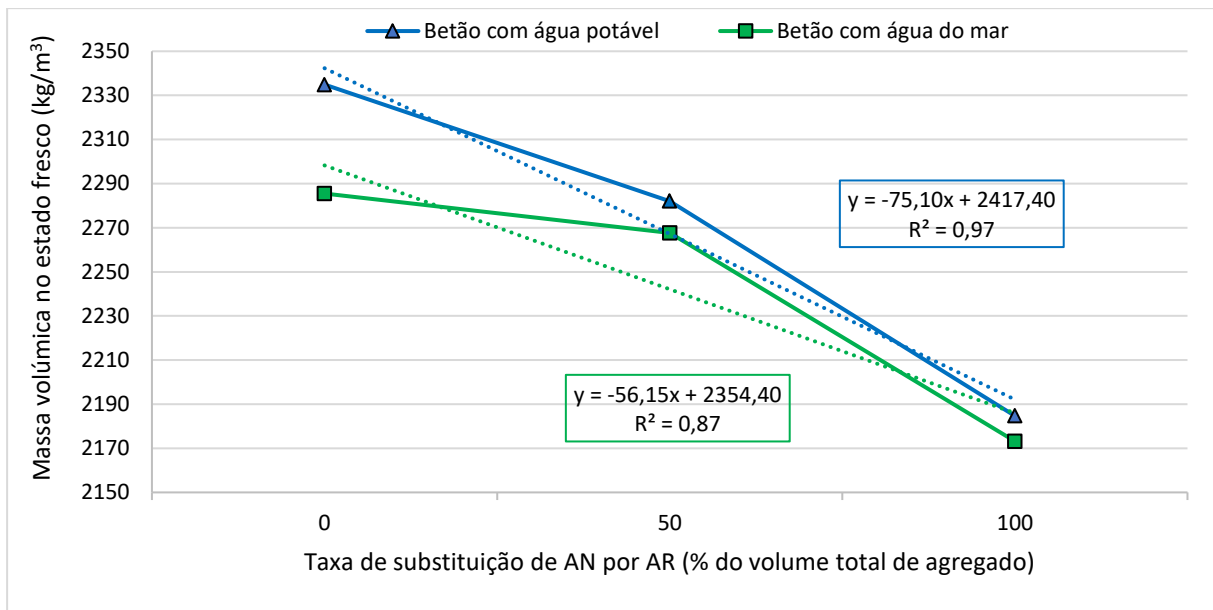


Figura 4.4 - Massa volúmica no estado fresco dos betões

Com base na Figura 4.5, é possível verificar que existe uma forte relação linear entre a massa volúmica no estado fresco e no estado endurecido em todos os tipos de betão, pois todos os valores de R^2 atingem valores superiores a 0,97.

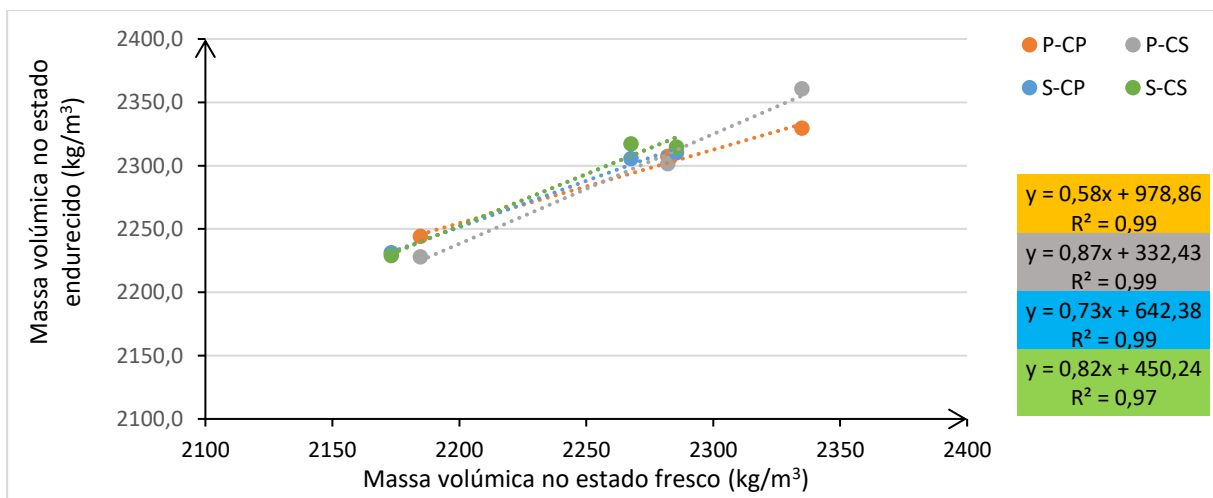


Figura 4.5 - Relação entre massa volúmica no estado fresco e endurecido

4.3.3. Síntese

Para se obter uma trabalhabilidade constante, foi necessário ajustar a relação A/C à medida que a percentagem de AR aumentava. No entanto, manteve-se sempre a relação A/C efetiva. Pelo contrário, foi necessário aumentar a relação A/C efetiva com a substituição de água potável por água do mar, isto é atribuído à presença de grandes quantidade de $NaCl$ contidos na água do mar que aceleram a hidratação do cimento, de acordo com Li *et al.* (2018) e JCI (2015). Relativamente ao ensaio de massa volúmica no estado fresco, como foi visto no subcapítulo 4.2.3, massa volúmica dos betões com AR é menor do que a dos betões com AN, devido ao facto de os AR terem uma menor massa volúmica do que os AN grossos. Também é verificado que a utilização de água do mar na produção de betão não

tem um efeito significativo na massa volúmica fresca. A maior relação de A/C efetiva dos betões com água do mar faz diminuir a proporção de agregados introduzidos nas misturas, o que reduz ligeiramente a massa volúmica das misturas.

4.4. Propriedades do betão no estado endurecido

Neste subcapítulo, são descritos e analisados os resultados dos ensaios mecânicos no estado endurecido realizados aos betões produzidos.

4.4.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão permite avaliar de uma forma global a qualidade do betão. Este ensaio realizou-se a 7, 28 e 91 dias de idade, segundo a norma NP EN 12390-3 (2011), em cada tipo de betão produzido. Antes de mais, é necessário analisar que relação existe a 7, 28 e 91 dias entre a variação da resistência e o aumento da taxa de substituição de AN por AR.

Com base na Figura 4.6, é possível retirar algumas conclusões. Os betões com água do mar na composição, água potável na cura e 100% de AR, apresentam aos 7 dias um aumento maior em relação aos outros betões (P-CP-100, P-CS-100 e S-CS-100), o mesmo sucede aos 28 dias tendo um aumento ainda maior, porém isto já não acontece aos 91 dias.

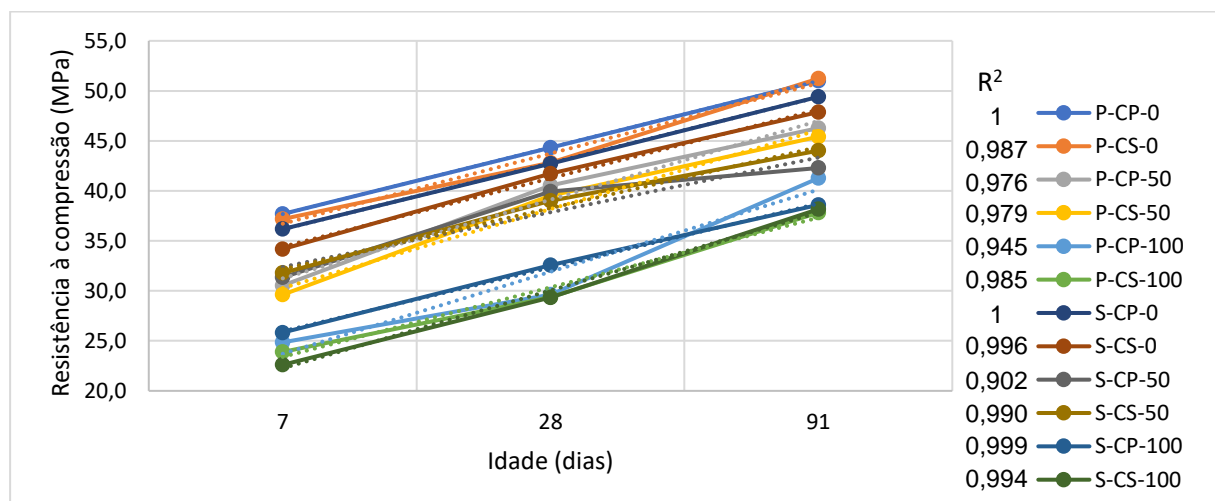


Figura 4.6 - Variação da resistência à compressão com a idade

Os resultados encontram-se na Figura 4.7(a, b e c). A partir desta figura, é possível verificar que, para qualquer idade, à medida que a taxa de substituição aumenta, a resistência à compressão diminui. Este resultado já era esperado, pois já se tinha verificado no ensaio de desgaste de Los Angeles, que os AR apresentam um desgaste maior face aos AN e, como consequência, provocam uma diminuição da resistência à compressão dos betões produzidos com AR. Através dos valores de R^2 presentes no Quadro 4.6, é possível verificar que a diminuição da resistência à compressão face ao aumento da taxa de substituição de AN por AR ocorre de uma forma linear nas diferentes idades de cada tipo de betão.

Na Figura 4.7 a), é visível que, a 7 dias de idade e com cura em água potável, o betão com água do mar na composição e sem AR apresentou valores de resistência 4% menores do que o BR, diferindo dos resultados obtidos por Etxeberria *et al.* (2016) e Younis *et al.* (2020) apresentados no subcapítulo 2.6.1.

Porém, existe um aumento no betão com 100% de AR e água do mar na composição. Esse aumento é devido ao efeito do sal de Friedel que é maior nos AR por serem porosos, fazendo esse sal entrar nos poros aumentando assim a resistência à compressão. Para além destes fatores, é importante ressaltar que este resultado pode dever-se também à maior relação A/C efetiva dos betões com água do mar. É de constatar que a resistência tende a aumentar com a idade e tende a diminuir com a taxa de substituição de AN por AR, como se pode observar nas Figuras 4.8 e 4.9.

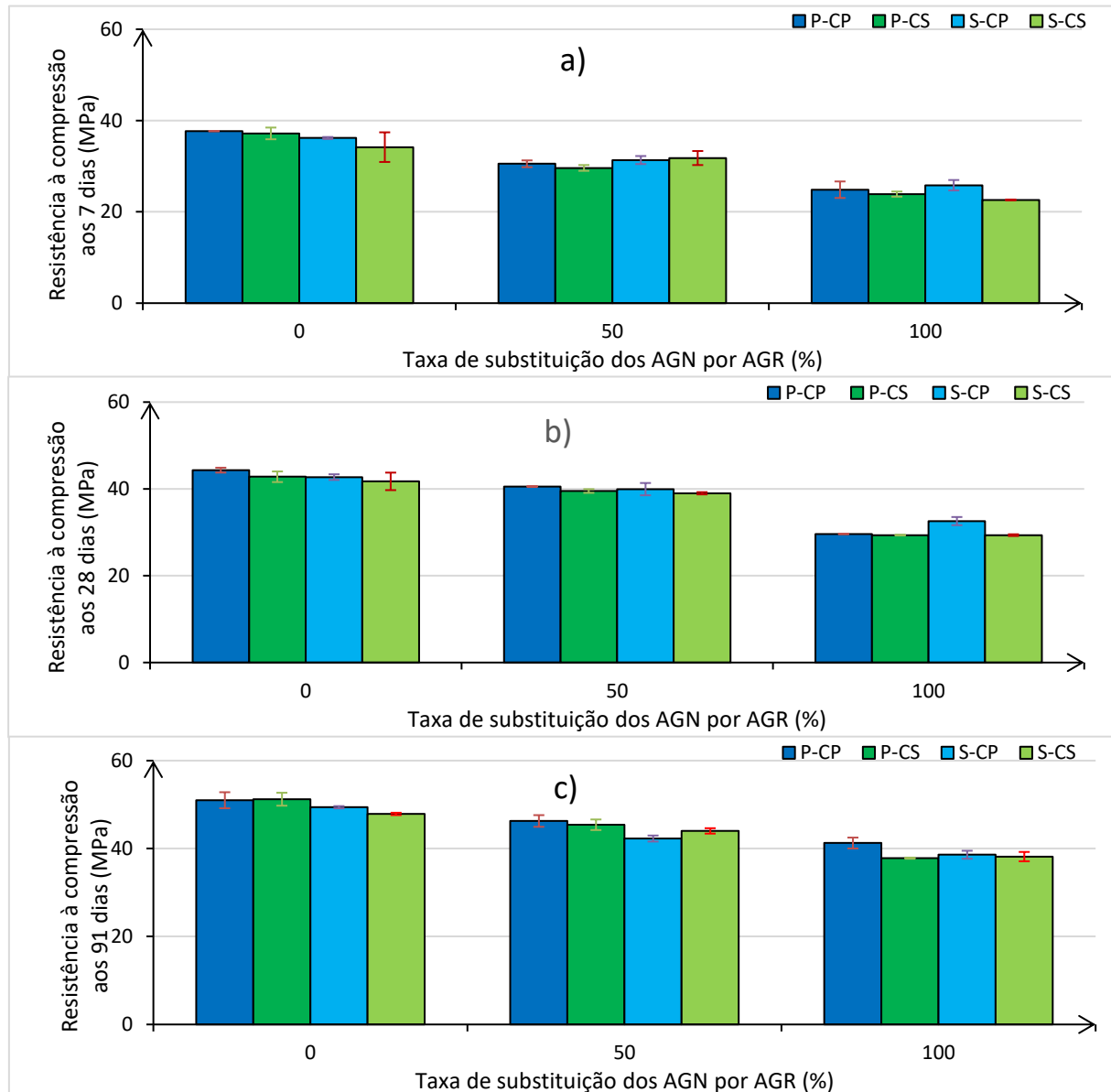


Figura 4.7 - Resistência à compressão em cubos a: (a) 7 dias de idade; (b) 28 dias de idade e (c) 91 dias de idade

Os efeitos negativos da água do mar e dos AR foram combinados simultaneamente nos betões S-CP-50, S-CS-50, S-CP-100 e S-CS-100. Analisando a Figura 4.7, os betões S-CP-50 e S-CP-100 apresentaram uma resistência à compressão menor do que a do BR em 17 e 31%, 10 e 26% e 17 e 24%, a 7, 28 e 91 dias, respetivamente. Por sua vez, nos betões S-CS-50 e S-CS-100, as diminuições para o BR foram as seguintes: a 7 dias, 16 e 40%, a 28 dias, 12 e 34% e a 91 dias, 14 e 25%, respetivamente.

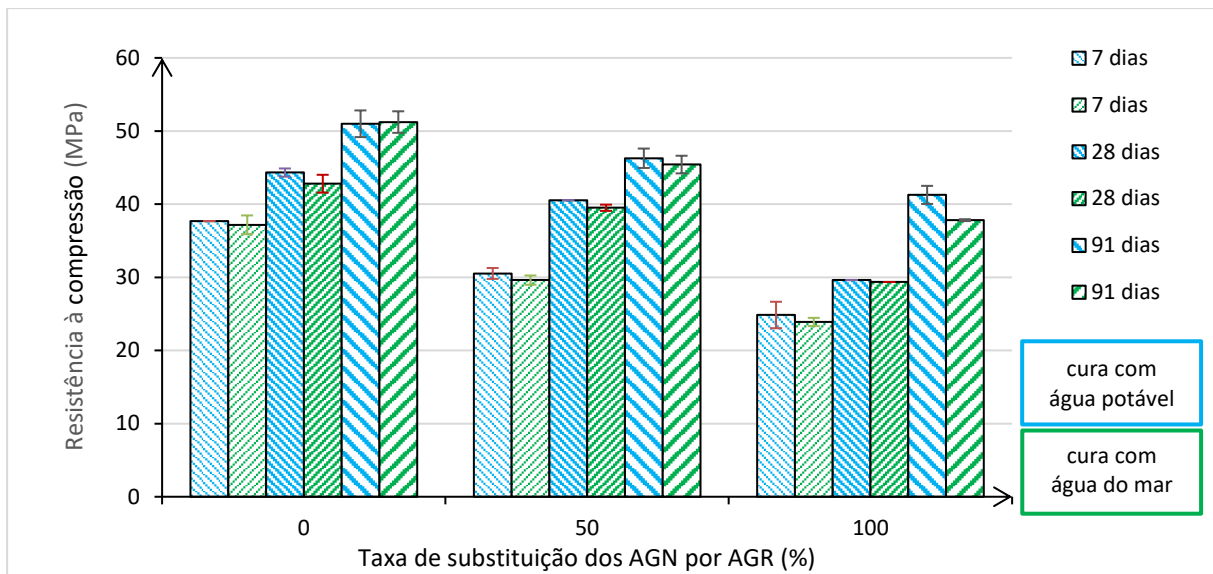


Figura 4.8 - Resistência à compressão com água potável na composição

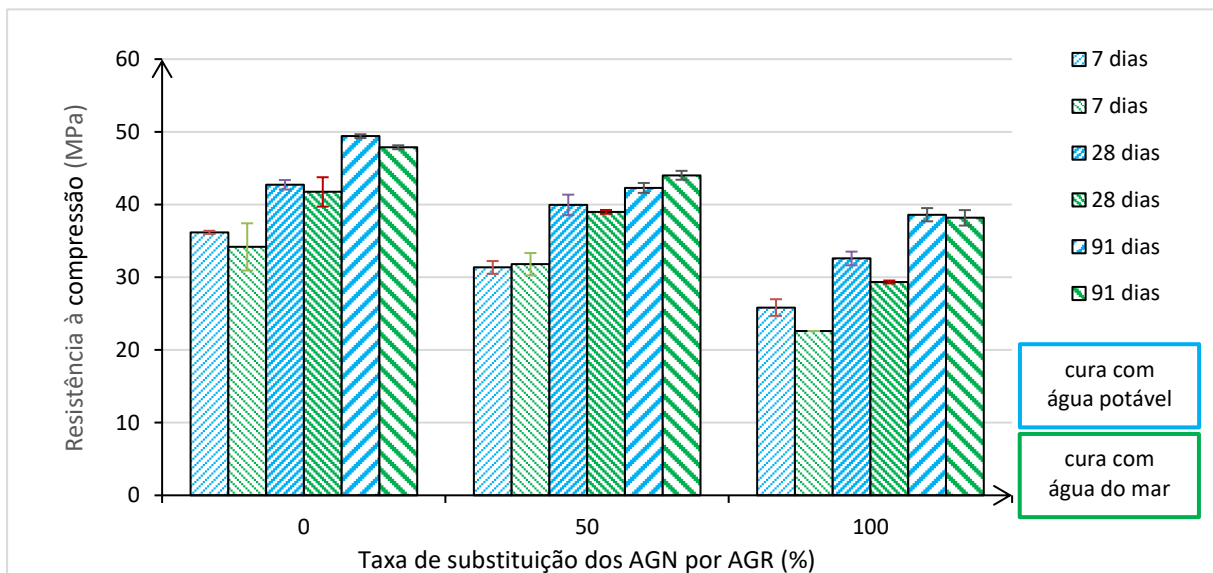


Figura 4.9 - Resistência à compressão com água do mar na composição

Foi igualmente avaliada a resistência à compressão dos betões com diferentes tipos de cura. É visível na Figura 4.8 que, nos betões com água potável na composição, a cura com água do mar diminui a resistência à compressão em todas as idades e em qualquer taxa de substituição. Como se pode observar na Figura 4.9, o mesmo sucede nos betões com água do mar na composição.

A cura do betão com água do mar, em betões com 50% de AR de RCD e água do mar na composição melhora a hidratação do cimento, em comparação com a cura com água potável. Isto é visível comparando os resultados obtidos a 91 dias em betões com cura potável (42,3,0 MPa) e com cura em água do mar (44,0 MPa). Assim, conclui-se que este tipo de betão teria um bom desempenho em condições marítimas a longo prazo. Estes resultados estão de acordo com Younis *et. al.* (2020).

Na presente dissertação, os betões produzidos com 100% de AR de RCD sofreram uma maior redução na resistência do que os betões com AN, o mesmo foi verificado por Etxeberria *et al.* (2016) no subcapítulo 2.6.1. Segundo Marinkovic *et al.* (2010), esta situação deve-se à maior porosidade dos AR.

Todos os resultados obtidos ao longo deste ensaio podem ser encontrados no Anexo E1.

Quadro 4.6 - Coeficientes de regressão linear da resistência à compressão

Tipo de betão	R ²		
	7 dias	28 dias	91 dias
P-CP	1,00	0,93	1,00
P-CS	0,99	0,92	0,99
S-CP	1,00	0,94	0,97
S-CS	0,90	0,91	0,99

4.4.2. Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral em cilindros a 28 dias de idade, realizou-se segundo a norma NP EN 12390-6 (2011), em cada tipo de betão produzido.

Através da Figura 4.10, é possível verificar que a superfície de rotura obtida após a realização deste ensaio em betões com AR atravessa os agregados. Deste modo, percebe-se que, no casos dos betões com AR, a resistência à tração é comandada pela capacidade resistente dos AR. Assim, devido a este facto, verifica-se através da Figura 4.11 que a resistência à tração tende a diminuir com o aumento da taxa de substituição de AN por AR.



Figura 4.10 - Superfícies de rotura verificadas no ensaio de tração por compressão diametral

De acordo com Gomes *et al.* (2009) e Bravo *et al.* (2015), a resistência à tração é bastante afetada pelo uso de AR de RCD nos betões com água potável. Isto deve-se ao elevado teor de AR cerâmicos de RCD. Por sua vez, quando a água do mar e os AR são utilizados em conjunto no betão, provocam uma diminuição da resistência à tração ainda maior.

A diminuição da resistência à tração nos betões, com o aumento da taxa de substituição dos AN por AR, ocorre de uma maneira fortemente linear. Tal é comprovado pelos elevados valores obtidos para os coeficientes de determinação (R²) das regressões lineares, entre 0,89 e 0,99 (Quadro 4.7).

Analisando o Quadro 4.8, verifica-se que os betões S-CP-100 e S-CS-100 apresentaram resistências à tração menores do que a do BR em 46 e 41%, respetivamente. Assim, é de realçar que neste tipo de betão (com água do mar na composição e 100% de AR), a cura em água do mar teve uma influência positiva na resistência à tração.

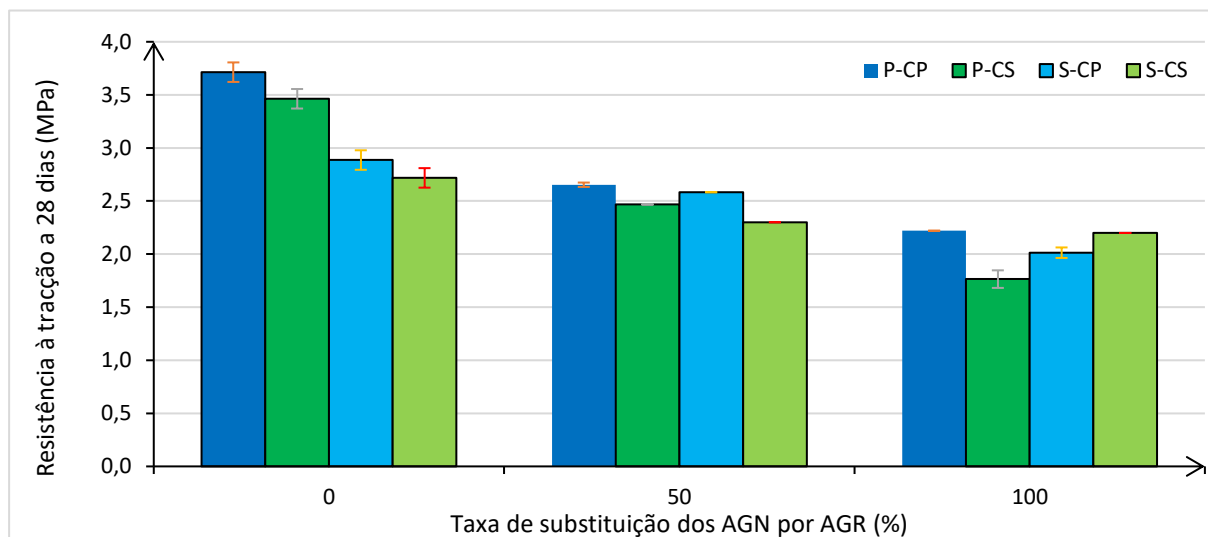


Figura 4.11 - Resistência à tração aos 28 dias de idade

Quadro 4.7 - Coeficientes de regressão linear da resistência à tração com o aumento da taxa de substituição de agregados

Tipo de betão	R ²
	28 dias de idade
P-CP	0,95
P-CS	0,99
S-CP	0,97
S-CS	0,89

Quadro 4.8 - Variação da resistência à tração, relativamente ao BR

Tipo de betão	Variação para o BR
	28 dias de idade
P-CP-50	-29%
P-CP-100	-40%
P-CS-0	-7%
P-CS-50	-34%
P-CS-100	-52%
S-CP-0	-22%
S-CP-50	-30%
S-CP-100	-46%
S-CS-0	-27%
S-CS-50	-38%
S-CS-100	-41%

Este ensaio está diretamente relacionado com o ensaio de resistência à compressão, tal como pode ser verificado na Figura 4.12. Destaque-se que nos betões S-CP existe uma relação linear quase perfeita, demonstrada pela obtenção de um R² de 0,99. Nos outros tipos de betão, P-CS, P-CP e S-CS, esta relação não é tão forte quanto a mencionada anteriormente, tendo-se obtido R² de 0,86, 0,76 e 0,63, respetivamente.

Todos os resultados obtidos ao longo deste ensaio podem ser encontrados no Anexo E2.

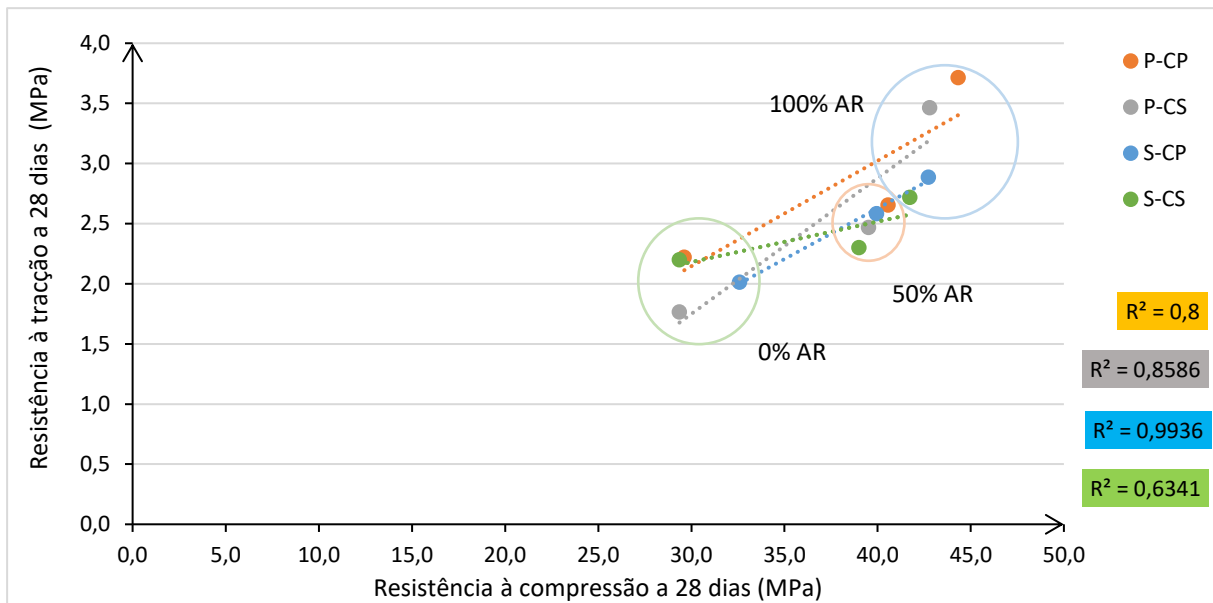


Figura 4.12 - Relação linear entre a resistência à compressão e a resistência à tracção

4.4.3. Módulo de elasticidade

O ensaio do módulo de elasticidade a 28 dias de idade realizou-se segundo a norma LNEC E 397 (1993), em cada tipo de betão produzido. Na Figura 4.13, podem ser encontrados os resultados obtidos ao longo deste ensaio.

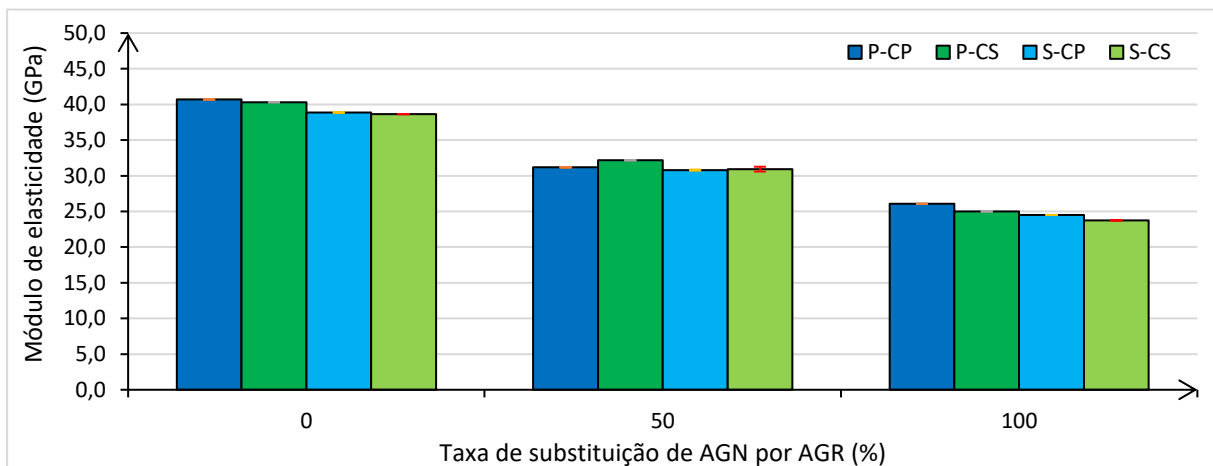


Figura 4.13 - Módulo de elasticidade a 28 dias de idade

Nesta figura, observa-se que, à medida que a percentagem de AR aumenta, regista-se uma redução dos valores do módulo de elasticidade. Esta redução está de acordo com a literatura (subcapítulo 2.5.4), e depende do facto de os AR apresentarem uma massa volúmica menor do que os AN. Estas reduções ocorrem de modo linear, sendo que os valores dos coeficientes de determinação (R^2) das regressões lineares atingem valores superiores a 0,97, para todos os tipos de betão (Quadro 4.9).

No Quadro 4.10, é visível que os valores do módulo de elasticidade variam muito pouco com o tipo de cura, mas diminuem com a introdução de água do mar na composição do betão. De acordo com os

resultados existentes na literatura, esta diminuição deve-se aos Cl^- presentes na água do mar, que entrando no processo de hidratação de cimento, originam um aumento do volume dos cristais de cloreto do sódio, resultando em fissuração interna no betão e levando à diminuição do módulo de elasticidade. No betão P-CP-50, ocorre uma diminuição na ordem de 23%, enquanto no betão P-CS-50 esta diminuição é de 21%, comparativamente com o valor obtido para o BR. Porém, quando se incorpora 100% de AR de RCD, esta redução é de 36 e 39%, respetivamente. Por sua vez, nos betões S-CP-50 e S-CS-50, a redução foi de 24% em ambos os betões. Por fim, nos betões S-CP-100 e S-CS-100, a variação foi mais elevada, situando-se em 40 e 42%, respetivamente. Conclui-se assim que as maiores perdas de rigidez ocorrem nos betões com 100% de AR, nos quais a alteração de água potável por água do mar, na composição e na cura do betão, provocou um acréscimo de 5,7% na redução do módulo de elasticidade (Quadro 4.11).

Quadro 4.9 - Coeficientes de regressão linear do módulo de elasticidade com o aumento da taxa de substituição de agregados

Tipo de betão	R ²
	28 dias de idade
P-CP	0,97
P-CS	1,00
S-CP	0,99
S-CS	1,00

Quadro 4.10 - Módulo de elasticidade a 28 dias de idade

Tipo de betão	P-CP			P-CS			S-CP			S-CS		
	0	50	100	0	50	100	0	50	100	0	50	100
Módulo de elasticidade (GPa)	40,7	31,2	26,1	40,3	32,2	25,0	38,9	30,8	24,5	38,6	30,9	23,7

Quadro 4.11 - Variação do módulo de elasticidade, relativamente ao BR

Tipo de betão	Varição para o BR
	28 dias de idade
P-CP-50	-23%
P-CP-100	-36% ↑
P-CS-0	-1%
P-CS-50	-21%
P-CS-100	-39% → -5,7%
S-CP-0	-4%
S-CP-50	-24%
S-CP-100	-40%
S-CS-0	-5%
S-CS-50	-24%
S-CS-100	-42% ↓

Todos os resultados obtidos ao longo deste ensaio, podem ser encontrados no Anexo E3.

4.4.4. Ultrassons

Este ensaio não destrutivo permite determinar a velocidade de propagação das ondas no interior do provete de betão, sendo realizado segundo a norma NP EN 12504-4 (2007). Os elevados valores deste ensaio

significam uma boa qualidade do betão, ou seja, que o betão não possui grandes vazios ou fissuras.

A Figura 4.14 permite verificar que a introdução de AR e de água do mar no betão afeta a presente propriedade do betão.

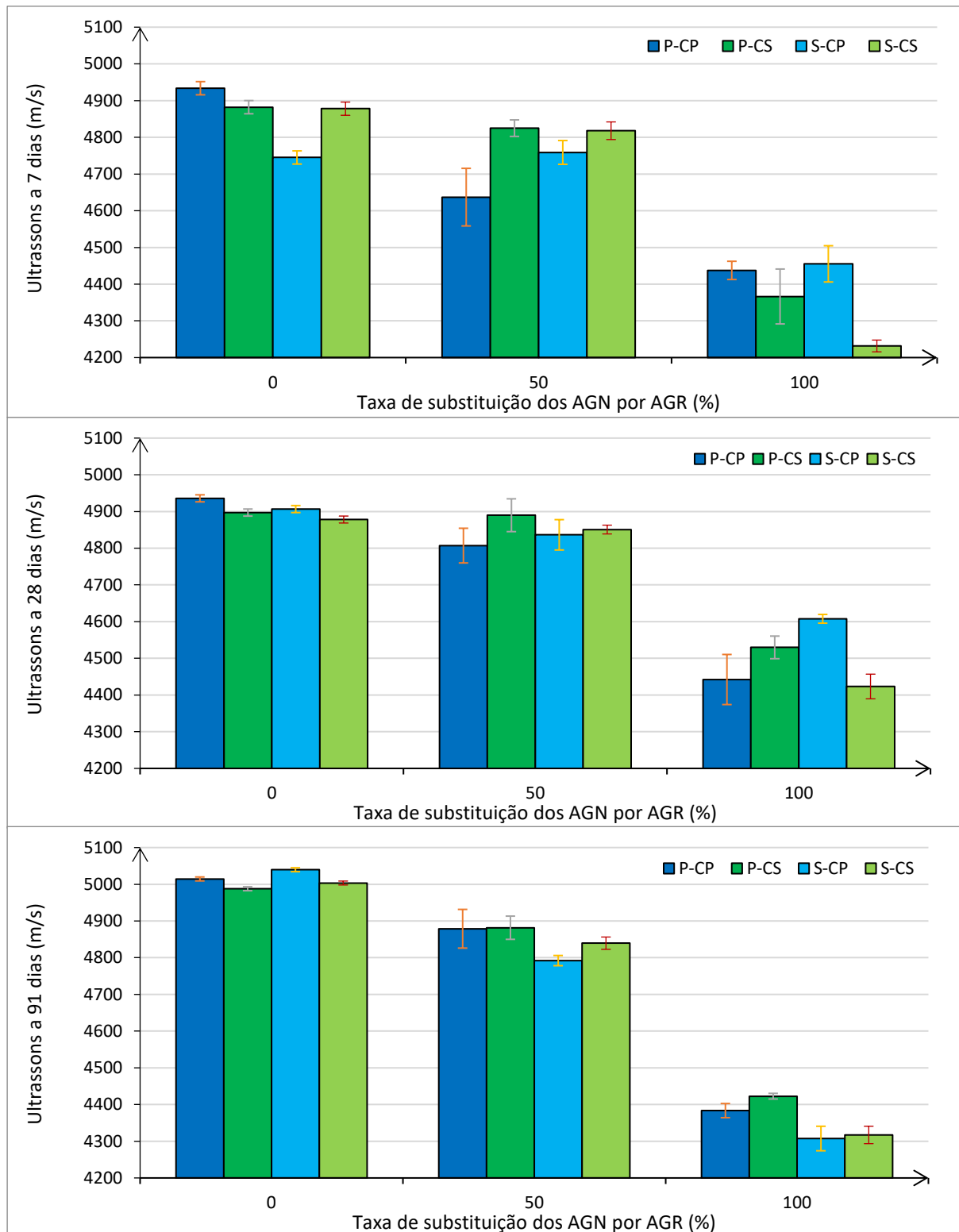


Figura 4.14 - Velocidade de propagação de ultrassons a 7, 28 e 91 dias de idade

A utilização de água do mar na composição e/ou na cura do betão com 50% de AR de RCD faz aumentar a velocidade de propagação de ultrassons a 28 dias de idade. No entanto, esta diminui a 91 dias, ao contrário do BR, que tende a aumentar a partir de 7 dias. O mesmo acontece com 100% de AR de RCD, sendo que, neste caso, os ultrassons aumentam a 28 dias de idade e diminuem a 91 dias de idade em todos os tipos de betão. Nos betões com 0% de AR, os ultrassons tendem a aumentar com a idade. Os resultados estão de acordo com encontrado na literatura (subcapítulo 2.5.5), visto que os valores do ensaio de ultrassons aumentam com a idade e diminuem à medida que o nível de substituição de AN por AR aumenta. Esta diminuição deve-se à porosidade dos AR cerâmicos e à argamassa aderida presente nos AR de betão.

No Quadro 4.12, é possível verificar que, nos betões com água do mar e 100% de AR de RCD, ocorre uma diminuição da velocidade de ultrassons a 91 dias de 14%, relativamente ao BR. Este betão com água do mar na composição, tanto para cura com água potável como para cura com água do mar, apresenta a maior redução na velocidade de propagação de ultrassons de entre todos os betões produzidos (-14%).

Através das Figuras 4.15 e 4.16, é possível verificar que existe uma forte relação linear entre os ultrassons e a resistência à compressão aos 28 dias. Por outro lado, na Figura 4.16 é possível verificar que a velocidade de propagação dos ultrassons e a massa volúmica no estado endurecido do betão apresentam uma relação aproximadamente linear, tendo-se obtido um elevado coeficiente de determinação (R^2) para a regressão linear realizada (0,84).

Quadro 4.12 - Variação dos ultrassons ao longo da idade relativamente ao BR

Tipo de betão	P-CP		P-CS			S-CP			S-CS		
	50	100	0	50	100	0	50	100	0	50	100
Varição a 7 dias	-6%	-10%	-1%	-2%	-11%	-4%	-4%	-10%	-1%	-2%	-14%
Varição a 28 dias	-3%	-10%	-1%	-1%	-8%	-1%	-2%	-7%	-1%	-2%	-10%
Varição a 91 dias	-3%	-13%	-1%	-3%	-12%	1%	-4%	-14%	0%	-3%	-14%

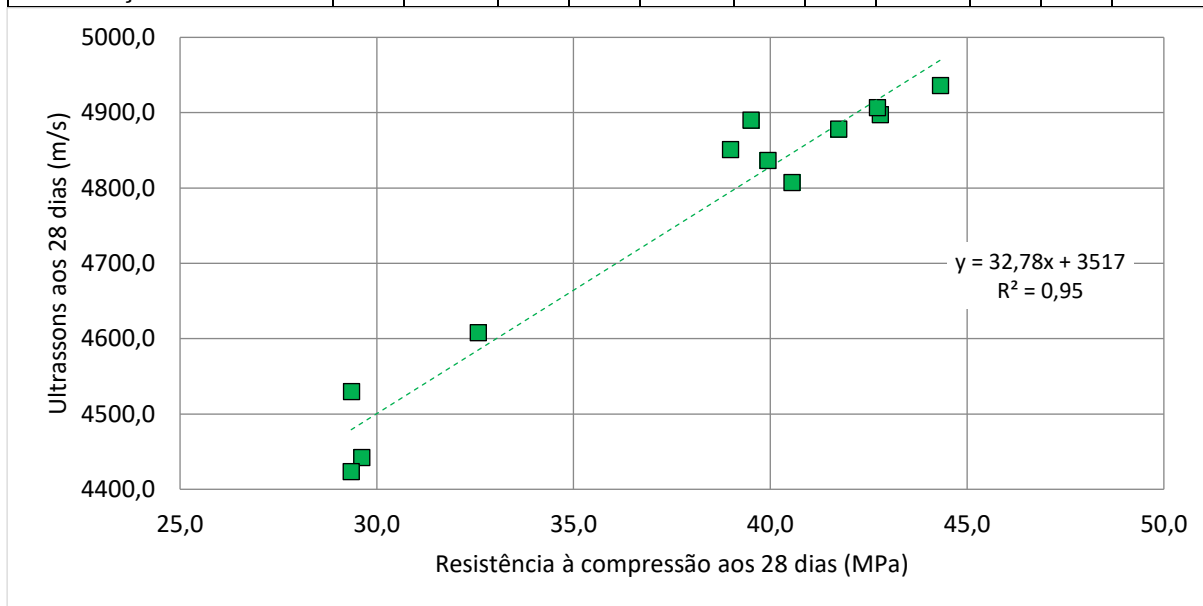


Figura 4.15 - Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons e a resistência à compressão

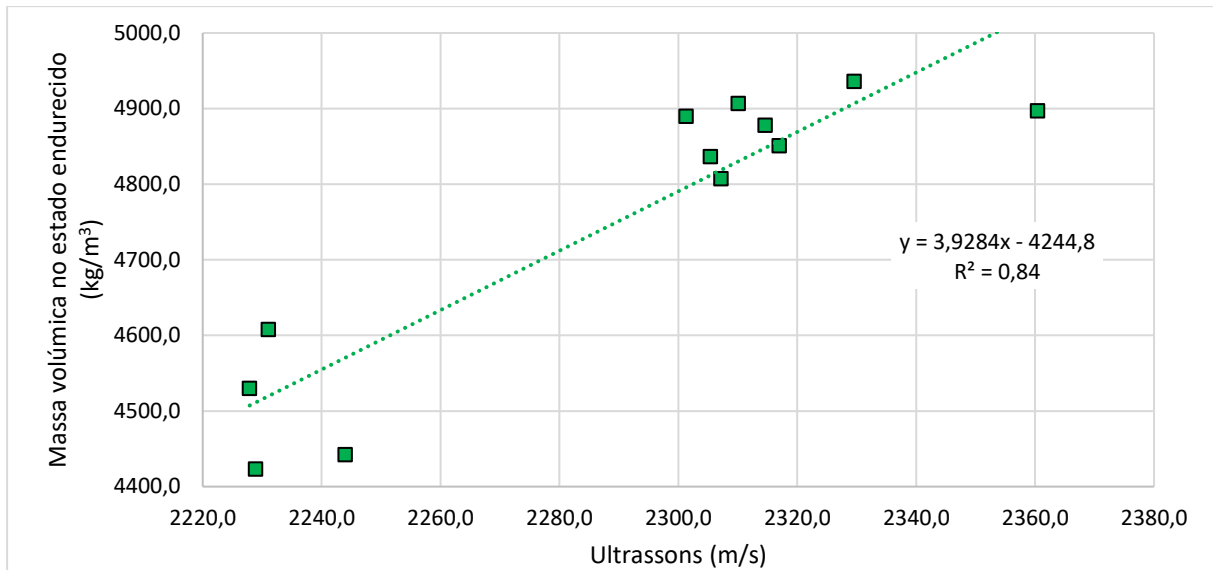


Figura 4.16 - Relação linear entre os ultrassons e a massa volúmica no estado endurecido

Todos os resultados obtidos ao longo deste ensaio, podem ser encontrados no Anexo E4.

4.4.5. Resistência à abrasão

A caracterização da resistência à abrasão realizou-se a 91 dias segundo a norma DIN52108 (2010), e visa avaliar a capacidade do betão em suportar comportamentos que podem provocar desagregação ou perda de secção por desgaste.

Os valores de desgaste médio obtidos, medidos através da perda de massa, e a respetiva variação relativamente ao BR, encontram-se sintetizados nos Quadros 4.13 e 4.14, sendo que os valores mais pormenorizados podem ser encontrados no Anexo E5. Analisando os quadros e a Figura 4.17, é perceptível que a resistência à abrasão aumenta com o acréscimo da taxa de substituição de AN por AR. Porém, no betão S-CS, este aumento é pouco significativo, o que se deve provavelmente a uma maior relação de A/C neste tipo de betão. Deste modo, os resultados obtidos vão ao encontro das investigações apresentados no subcapítulo 2.5.6.

Quadro 4.13 - Variação da resistência por abrasão com água potável (medida em perda de massa)

	P-CP		P-CS	
	Perda de massa (%)	Variação (%)	Perda de massa (%)	Variação (%)
0% de AR	4,6	-	5,2	14,68%
50% de AR	4,1	-9,20%	4,2	-8,60%
100% de AR	3,6	-21,88%	3,8	-17,32%

Quadro 4.14 - Variação da resistência por abrasão com água do mar (medida em perda de massa)

	S-CP		S-CS	
	Perda de massa (%)	Variação (%)	Perda de massa (%)	Variação (%)
0% de AR	4,3	-6,53%	4,3	-6,23%
50% de AR	4,2	-7,50%	4,3	-4,90%
100% de AR	3,8	-16,86%	4,1	-11,24%

A utilização de AR melhorou a resistência à abrasão de todos os betões. Isto pode ser justificado pela elevada força de ligação entre a pasta cimentícia e os AR. Segundo Brito *et al.* (2015) e Matias *et al.* (2013), esta forte ligação acontece devido à maior porosidade dos AR, que permite uma melhor penetração da pasta de cimento no seu interior. Por outro lado, este aumento pode estar relacionado com a composição de AR, principalmente devido à sua elevada rugosidade provocar uma melhor aderência à pasta de cimento, comparativamente ao verificado com AN. Esta melhor aderência pode originar uma maior resistência à abrasão nestes betões.

Através da Figura 4.17, é possível concluir que a variação da resistência à abrasão, com a substituição de AN por AR, ocorre de forma bastante linear, exceto no betão S-CS. Esta situação pode ser comprovada através dos valores dos coeficientes de determinação (R^2) das regressões lineares realizadas.

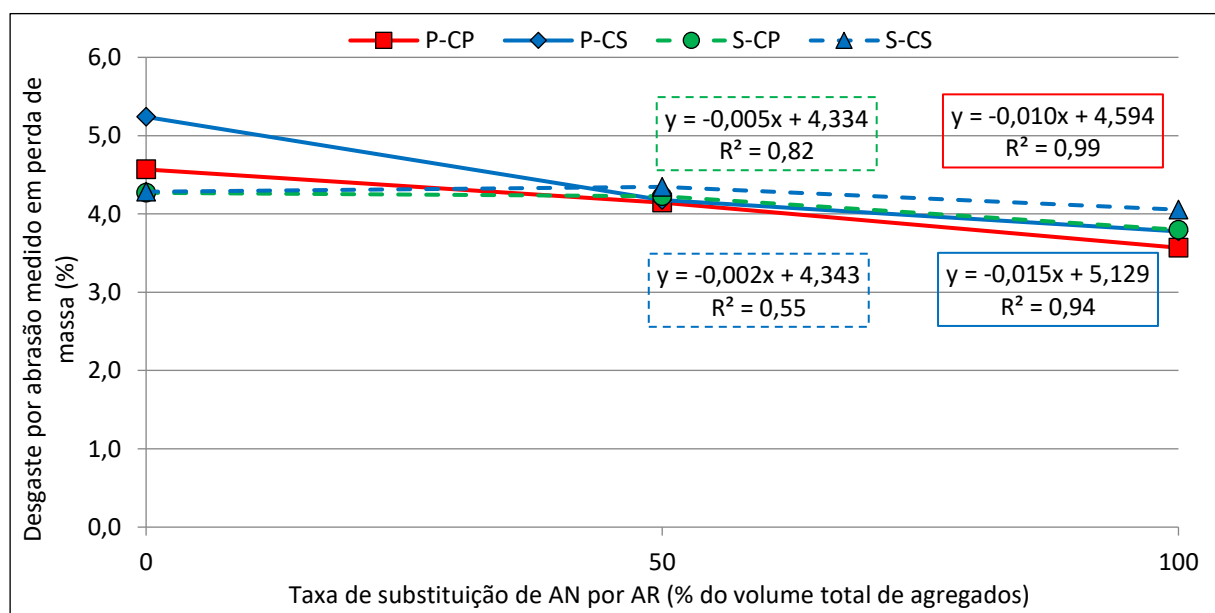


Figura 4.17 - Desgaste por abrasão medido em perda de massa

4.4.6. Síntese

Para qualquer idade, à medida que a taxa de substituição de AN por AR aumenta, a resistência à compressão diminui. Este resultado é uma consequência de um maior desgaste do ensaio de *Los Angeles* dos AR face aos AN. Aos 7 dias de idade, os betões com cura em água potável e água do mar na composição apresentam uma resistência à compressão menor do que era esperado segundo a literatura. A resistência tende a aumentar com a idade e a diminuir com o aumento da taxa de substituição de agregados. Nos betões com água potável na composição, a cura com água do mar diminui a resistência à compressão em todas as idades e para qualquer taxa de substituição de agregados. Porém, em betões com taxa de substituição de 50% de AN por AR, verifica-se que a cura com água do mar aumenta a resistência à compressão aos 7 e 91 dias. A cura do betão com água do mar em betões com 0 e 50% de AR e água potável na composição faz aumentar a resistência à compressão. A diminuição da resistência à compressão nos betões com água do mar deve-se à formação de gesso, uma vez que esta causa pressões expansivas.

A resistência à tração tende a diminuir com o aumento da taxa de substituição de AN por AR. Isto deve-se ao elevado teor de AR cerâmicos presentes nos RCD. Esta diminuição ainda é mais acentuada com o uso de água do mar na composição. Nos betões com água do mar na composição e 100% de AR, a cura em água do mar melhorou a resistência à tração, em comparação com a cura com água potável.

À medida que a percentagem de AR aumenta, o módulo de elasticidade diminui. Isto deve-se ao facto de os AR apresentarem uma massa volúmica menor do que os AN. O módulo de elasticidade varia muito pouco com o tipo de cura, mas diminui com a utilização de água do mar na composição do betão. Esta diminuição deve-se a fissuras internas do betão originadas por Cl^- presentes na água do mar. A maior diminuição do módulo de elasticidade ocorre nos betões com 100% de AR e com água do mar na composição e na cura.

A velocidade de propagação dos ultrassons aumenta com a idade e diminui com o aumento da taxa de substituição de AN por AR. O betão com 100% de AR e água do mar na composição, apresenta a maior redução na velocidade de propagação dos ultrassons a 91 dias.

A resistência à abrasão aumenta com a taxa de substituição de AN por AR em todos os betões, isto pode ser justificado pela elevada aderência entre a pasta de cimento e os AR. Ao incorporar AR e água do mar no betão, também se observou uma tendência de melhoria na resistência à abrasão.

Na maioria dos ensaios realizados, a utilização de AR e água do mar provocou uma diminuição significativa na qualidade do betão. Esta diminuição deve-se a uma maior relação de A/C total utilizada na composição dos betões com AR e principalmente nos betões com água do mar, de modo a obter uma trabalhabilidade constante em todos os tipos de betão produzidos.

5. Conclusões

5.1. Considerações finais

O esgotamento da água potável está a progredir a um ritmo excessivo a nível mundial. Assim sendo, é essencial utilizar água do mar na produção do betão, porque as reservas da água potável são limitadas e o seu transporte é dispendioso. A indústria de construção é o sector com maior impacte ambiental, pois consome grande quantidade de recursos naturais e energia e gera enorme quantidade de resíduos. Assim, a indústria da construção começou a valorizar RCD como AR na produção dos betões, devido à sua disponibilidade. Deste modo, a indústria consegue reduzir a sua pegada de carbono e continuar a crescer sem prejudicar o ambiente.

Neste capítulo final, são destacadas as principais conclusões relacionadas com a análise e discussão dos resultados obtidos através dos ensaios realizados aos betões produzidos.

5.2. Conclusões gerais

A caracterização mecânica dos betões com AR de RCD realizou-se ao longo das três fases da campanha experimental. Na primeira, foram definidos, preparados e caracterizados todos os materiais necessários para a produção dos betões, sendo que esta fase consistiu na recolha e posterior peneiração dos AR, bem como na recolha da água do mar necessária para a composição e cura dos betões. A segunda fase consistiu na realização dos ensaios aos agregados (análise granulométrica, baridade, massa volúmica e absorção, desgaste de *Los Angeles* e análise composicional), bem como na realização dos ensaios no estado fresco (abaixamento do cone de *Abrams* e massa volúmica). Por fim, a terceira e última fase consistiu na caracterização mecânica dos betões no estado endurecido, através dos seguintes ensaios: resistência à compressão em cubos, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, resistência à abrasão e velocidade de propagação dos ultrassons.

5.2.1. Caracterização dos betões no estado fresco

No estado fresco, os betões foram analisados através do abaixamento do cone de *Abrams* e da massa volúmica. O objetivo do ensaio do cone de *Abrams* foi garantir a manutenção da trabalhabilidade em todas as misturas, obtendo abaixamentos no intervalo de 100 a 150 mm (S3). Assim, foi necessário adicionar maior quantidade de água nos betões com água do mar e/ou AR. Porém, à medida que a percentagem de AR aumentava, a relação A/C efetiva manteve-se.

No Quadro 5.1, pode-se observar os resultados obtidos relativos ao abaixamento do cone de *Abrams*, massa volúmica e relação A/C total.

Através deste quadro, é possível retirar algumas conclusões. Os betões com água do mar necessitaram de uma maior relação A/C efetiva. Tal é atribuído à presença de grandes quantidades de *NaCl* contidos na água do mar, que aceleram a hidratação do cimento. Relativamente à massa volúmica, a substituição dos AN por AR reduz esta tanto nas misturas com água do mar como com água potável, o que se deve à menor massa volúmica dos AR.

Quadro 5.1 - Resultados dos ensaios ao betão no estado fresco

Tipo de betão	Abaixamento do cone de Abrams (mm)	Massa volúmica (kg/m ³)	Relação A/C total	Relação A/C efetiva
P-0	150	2334,9	0,55	0,55
P-50	119	2282,1	0,59	0,55
P-100	110	2184,7	0,63	0,55
S-0	115	2285,5	0,58	0,58
S-50	120	2267,6	0,62	0,58
S-100	105	2173,2	0,66	0,58

5.2.2. Caracterização dos betões no estado endurecido

A resistência à compressão e os ultrassons foram avaliados a 7, 28 e 91 dias, enquanto a resistência à tração e o módulo de elasticidade o foram apenas a 28 dias e a resistência à abrasão a 91 dias. Através de um ensaio de resistência à compressão em provetes cúbicos, constatou-se que o betão de referência produzido pertence à classe de resistência C30/35. Com a introdução de água do mar e AR, a resistência à compressão dos betões foi afetada. Este resultado do ensaio deve-se a um aumento da taxa de substituição dos AN por AR, assim como à maior relação A/C de todos os betões com água do mar em detrimento da água potável. Por outro lado, pode também dever-se à formação de gesso, que provoca pressões de cristalização expansiva.

Em relação ao ensaio de resistência à tração, verificou-se também uma redução desta propriedade com a utilização de AR e água do mar, devido ao aumento da relação A/C dos betões. A incorporação de água do mar no betão prejudicou drasticamente a resistência à tração, obtendo-se uma diminuição da resistência à tração de aproximadamente 50%, em relação ao betão de referência. A resistência à tração é comandada pela capacidade resistente dos AR, pois pôde-se observar que a sua superfície de rotura atravessa os agregados.

Através da avaliação do módulo de elasticidade dos betões, concluiu-se que houve um decréscimo com a substituição de AN por AR e com a utilização de água do mar. O betão P-CS-50 foi o que demonstrou ter o melhor resultado (decréscimo de 21%). Em contrapartida, o betão S-CS-100 foi o que teve o pior resultado (decréscimo de 42%), em relação a esta propriedade.

Relativamente ao ensaio de resistência à abrasão, constatou-se que a utilização de AR grossos proporcionou uma melhoria nesta propriedade. Os resultados mostraram que o uso de água do mar na composição dos betões influencia evidentemente os resultados da resistência à abrasão. No betão P-CS-100, a resistência à abrasão atingiu um aumento de 22%, relativamente ao betão de referência. Este betão foi o que apresentou os melhores resultados, enquanto o betão P-CS-0 mostrou o pior resultado (decréscimo de 15%), possivelmente devido a um erro experimental. Conclui-se, assim, que a utilização dos AR grossos melhora a resistência à abrasão, devido à melhor ligação entre a pasta cimentícia e os AR grossos.

No que respeita ao ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons, esta diminuiu com o aumento da taxa de substituição dos AN por AR. Porém, os resultados dos ultrassons praticamente não são afetados pela introdução da água do mar nos betões.

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos efetuados na 3ª fase experimental estão sintetizados no

Quadro 5.2, através das variações relativamente ao BR.

Quadro 5.2 - Propriedades mecânicas dos betões no estado endurecido

Tipo de betão	Resistência à compressão a 7 dias (MPa)	Resistência à compressão a 28 dias (MPa)	Resistência à compressão a 91 dias (MPa)	Resistência à tração a 28 dias (MPa)	Módulo de elasticidade a 28 dias (GPa)	Ultrassons a 28 dias (m/s)	Ultrassons a 91 dias (m/s)	Resistência à abrasão - perda de massa (%)
P-CP-0	37,3	44,3	51,0	3,7	40,7	4935,8	5014	4,6
P-CP-50	-19%	-9%	-9%	-29%	-23%	-3%	-3%	9%
P-CP-100	-34%	-33%	-19%	-40%	-36%	-10%	-13%	22%
P-CS-0	-1%	-3%	0%	-7%	-1%	-1%	-1%	-15%
P-CS-50	-21%	-11%	-11%	-34%	-21%	-1%	-3%	9%
P-CS-100	-37%	-34%	-26%	-52%	-39%	-8%	-12%	17%
S-CP-0	-4%	-4%	-3%	-22%	-4%	-1%	1%	7%
S-CP-50	-17%	-10%	-17%	-30%	-24%	-2%	-4%	8%
S-CP-100	-31%	-26%	-24%	-46%	-40%	-7%	-14%	17%
S-CS-0	-9%	-6%	-6%	-27%	-5%	-1%	0%	6%
S-CS-50	-16%	-12%	-14%	-38%	-24%	-2%	-3%	5%
S-CS-100	-40%	-34%	-25%	-41%	-42%	-10%	-14%	11%

A influência negativa dos cloretos contidos na água do mar diminui com a idade. Este facto foi verificado através da resistência à compressão nos betões com água do mar a 91 dias. Porém, ao contrário do esperado, a microestrutura do betão não melhora precocemente devido à aceleração do processo de hidratação criado pela entrada de Cl^- e formação de $Ca(OH)_2$.

A 28 dias, a diminuição dos valores de resistência varia entre 10 e 34%, aquando da incorporação conjunta da água do mar e de AR, enquanto a 91 dias de idade esse intervalo se situa entre 3 e 25%. A resistência à compressão a 90 dias dos provetes com água do mar na composição e na cura e 100% de AR é cerca 9% maior do que a sua resistência a 28 dias; este aumento provavelmente deve-se à pouca cristalização do sal da água do mar com 100% de AR.

O aumento da resistência é mais lento em betões com água do mar do que em betões com água potável, o que segundo a literatura não era expetável. A resistência do betão S-CP-100 a 7 e 28 dias é superior à verificada no betão P-CP-100 e S-CS-100.

O método de cura com água do mar diminui ligeiramente a resistência à compressão em todas as idades e em todos os betões realizados. Segundo a literatura, a resistência à compressão devia ser menor nos betões curados com água do mar nas idades iniciais e aumentar a partir de 56 dias, relativamente aos betões curados em água potável, mas isto não é verificado. Por outras palavras, ao contrário dos resultados obtidos na presente dissertação, os betões produzidos com água do mar tiveram uma maior resistência à compressão do que os produzidos com água potável, tanto a 7 como a 28 dias, devido à matriz de cimento ser mais densa. Conclui-se, assim, que a natureza expansiva da água do mar poderá causar fissuras no betão, aumentando a porosidade do mesmo, e diminuindo assim a resistência à compressão.

Em relação à resistência à tração, a cura do betão com água do mar leva a uma ligeira diminuição

desta propriedade nos betões com AN, mas o mesmo não se observa nos betões com 100% de AR, onde existe um aumento na resistência de 5% ao utilizar cura com água do mar. Ao contrário do exposto na literatura, os betões produzidos com água do mar e AR e curados em água do mar apresentam uma resistência à tração inferior em comparação aos betões curados em água potável.

Nos resultados do módulo de elasticidade, verificou-se que o módulo de elasticidade dos betões com água do mar diminui ligeiramente, em comparação com os betões com água potável, sendo que esta diminuição se deve a fissuras internas do betão originadas por um aumento do volume dos cristais de *NaCl* que ocorre com a hidratação do cimento. Segundo a literatura, o módulo de elasticidade em betões com água do mar na composição ou na cura diminui de forma menos acentuada do que o verificado no ensaio de resistência à compressão. Porém, isto não se verifica nos resultados obtidos. Apesar disso, as perdas registadas são ainda assim inferiores às que se verificaram na resistência à tração.

Relativamente a resistência à abrasão, os betões produzidos com água do mar, AR e curados em água do mar apresentam valores superiores aos obtidos para o BR, mas ligeiramente inferiores aos de outros betões ensaiados.

De todas as propriedades apresentadas, só duas foram estudadas a 28 e a 91 dias, a resistência à compressão e os ultrassons. Porém, é importante referir que, de 28 para 91 dias, a discrepância de valores relativamente ao BR tende a ser menor em todos os betões, menos nos betões S-CP-50 e S-CS-50 que tendem a aumentar.

Na maioria das vezes, a água do mar na composição e/ou na cura, assim como os AR, afetam negativamente as propriedades analisadas. Porém, a água do mar sem AR apresenta reduções bastante razoáveis, sendo que a resistência à tração é a propriedade que mais sofre com esta alteração.

Os efeitos negativos da utilização conjunta de água do mar e de AR foram refletidos no seu desempenho e estão de acordo com a literatura. Porém estes podem ser perfeitamente aplicados em estruturas de betão não estrutural.

5.3. Desenvolvimentos futuros

Como é sabido, o betão é o material de construção mais utilizado no mundo, sendo anualmente produzidos mais de 15 bilhões m³ de betão. No último século, os investigadores têm centrado as suas atenções na redução do impacto ambiental provocado pelo betão, tanto através da diminuição da poluição provocada pela produção de cimento Portland, como pela redução das consequências da utilização de agregados naturais.

No entanto, o consumo de água potável na produção e cura do betão é também bastante significativo. Atualmente, a escassez de água é um dos problemas mais importantes em termos mundiais, sendo que, devido às alterações climáticas, a previsão é que este problema se amplie. Assim, a substituição da água potável utilizada em betão por outro tipo de águas afigura-se imprescindível. A utilização de água salgada em betões pode ser uma solução para esta problemática. Esta solução pode permitir a

manutenção do desempenho deste material, melhorando-o numa perspetiva ambiental. Assim, urge caracterizar detalhadamente o desempenho destes betões.

Com base neste contexto, esta dissertação, de carácter inovador, analisou a viabilidade em utilizar água do mar na composição e na cura de betões com e sem AR grossos. Porém, de modo a verificar esta viabilidade, mais estudos devem ser feitos nesta área.

Seguidamente, surgem algumas propostas para um futuro desenvolvimento desta temática:

- comportamento mecânico de betões sustentáveis produzidos com água salgada e escória de alto forno;
- comportamento mecânico de betões sustentáveis produzidos com água salgada e agregados reciclados finos;
- comportamento estrutural de betões sustentáveis produzidos com água salgada e varões reforçados com fibras de vidro.

Referências bibliográficas

Publicações escritas - Artigos científicos e livros

Abd Elhakam, A. e Awad, E. (2012) - "Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete". *Construction and Building Materials*, 35, pp. 421-427.

Abera, S.A. (2022) - "Analytical study on properties of concrete materials incorporating recycled aggregates from construction and demolition waste". *Materials Today: Proceedings*, 52, pp. 2172-2183.

Abrams, D. A. (1924) - "Tests of impure waters for mixing concrete". *Structural Materials Research Laboratory*, 20, pp. 442-486,

Agrela, F., De Juan, M. S., Ayuso, J., Galdes, V. L. e Jiménez, J. R. (2011) - "Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete". *Construction and Building Materials*, 25(10), pp. 3950-3955.

Bairagi, N. K., Ravande, K. e Pareek, V. K. (1993) - "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates". *Resources, conservation and recycling*, 9(1-2), pp. 109-126.

Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R. e Maiti, S. (2014) - "Recycled aggregate from C&D waste and its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review". *Construction and Building Materials*, 68, pp. 501-516.

Borg, R. P., Cuenca, E., Gastaldo Brac, E. M. e Ferrara, L. (2018) - "Crack sealing capacity in chloride-rich environments of mortars containing different cement substitutes and crystalline admixtures". *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 7(3), pp. 141-159.

Bravo, M., Brito, J., Pontes, J. e Evangelista, L. (2015) - "Desempenho de betões produzidos com agregados reciclados obtidos a partir de RCD de centrais de reciclagem portuguesas". *Materiais de Construção*, 115.

Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J. e Evangelista, L. (2015) - "Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants". *Journal of Cleaner Production*, 99, pp. 59-74.

Brito, J. de (2005) - "Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões". *Lição de síntese para provas de agregação*, Instituto Superior Técnico, Portugal, 91 p.

Brito, J. de, Pereira, A. S. e Correia, J. R. (2005) - "Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates". *Cement and Concrete Composites*, 27(4), pp. 429-433.

Brito, J. de e Robles, R. (2010) - "Recycled aggregate concrete (RAC) methodology for estimating its long-term properties". *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 17(6), pp. 449-462.

Butera, S., Christensen, T. H. e Astrup, T. F. (2014) - "Composition and leaching of construction and demolition waste: Inorganic elements and organic compounds". *Journal of Hazardous Materials*, 276,

pp. 302-311.

Corinaldesi, V. e Moriconi, G. (2009) - "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials*, 23(8), pp. 2869-2876.

Cui, M., Mao, J.-Z., Jia, D.-G. e Li, B. (2014) - "Experimental Study on Mechanical Properties of Marine Sand and Seawater Concrete". *International Conference on Mechanics and Civil Engineering*, pp. 106-111.

Dasar, A., Patah, D., Hamada, H., Sagawa, Y. e Yamamoto, D. (2020) - "Applicability of seawater as a mixing and curing agent in 4-year-old concrete". *Construction and Building Materials*, 259, 119692.

Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A. e Barra, M. (2007) - "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete". *Cement and Concrete Research*, 37(5), pp. 735-742.

Etxeberria, M., Gonzalez-Corominas, A. e Pardo, P. (2016) - "Influence of seawater and blast furnace cement employment on recycled aggregate concretes' properties". *Construction and Building Materials*, 115, pp. 496-505.

Evangelista, L. e Brito, J. de (2007) - "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates". *Cement and Concrete Composites*, 29(5), pp. 397-401.

Faury, J. e Caquot, A. (1958) - "Le béton". 3^a Ed., Dunod, Paris, France.

Ferreira, L. (2007) - "Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão: influência da pré-saturação". *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.*

Ferreira, L., de Brito, J. e Barra, M. (2011) - "Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties". *Magazine of Concrete Research*, 63(8), pp. 617-627.

Fonseca, N., De Brito, J. e Evangelista, L. (2011) - "The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste". *Cement and Concrete Composites*, 33(6), pp. 637-643.

Galloway, J. (1994) - "Grading, shape, and surface properties". Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, 169C, pp. 401-410.

Gani, M.S.J. (1997) - "Cement and concrete". 1st ed. England: Chapman and Hills, pp. 49-169.

Ghorbani, S., Sharifi, S., Ghorbani, S., Tam, V. W., De Brito, J. e Jurda, R. (2019) - "Effect of crushed concrete waste's maximum size as partial replacement of natural coarse aggregate on the mechanical and durability properties of concrete." *Resources, Conservation and Recycling*, 149, pp. 664-673.

Gomes, M. e de Brito, J. (2009) - "Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance". *Materials and Structures*, 42(5), pp. 663-675.

Gonzalez-Corominas, A. e Etxeberria, M. (2014) - "Properties of high performance concrete made

with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates". *Construction and building materials*, 68, pp. 618-626.

Goyal, A. e Karade, S. R. (2020) - "Steel Corrosion and Control in Concrete Made with Seawater". *Innovations in Corrosion and Materials Science*, 10, pp. 58-67.

Griffin, D. F. e Henry, R. L. (1963) - "The effect of salt in concrete on compressive strength, water vapor transmission, and corrosion of reinforcing steel". *ASTM*, pp. 1046-1078.

Gua, M., Hu, B., Xing, F., Zhou, X., Sun, M., Sui, L. e Zhou, Y. (2020) - "Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis". *Construction and Building Materials*, 234, 117339.

Hafez, H., Kurda, R., Al-Ayish, N; Garcia-Segura, T., Cheung, W.M. e Nagaratnam, B. (2021) - "A whole life cycle performance-based ECONomic and ECOlogical assessment framework (ECO2) for concrete sustainability". *Journal of Cleaner Production*, 292, 126060.

Hansen, T. (1986) - "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985". *Materials and Structures*, 19(3), pp. 201-246.

Hewlett, P. e Liska, M. (2004) - "Lea's chemistry of cement and concrete". 4th Editions, Butterworth-Heinemann.

JCI, Japan Concrete Institute (2015) - "JCI Technical Committee Report on the Use of Seawater in Concrete".

Jiménez, J. R., Ayuso, J., Galvín, A. P., López, M. e Agrela, F. (2012) - "Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads". *Construction and Building Materials*, 34, pp. 34-43.

Jones, M. R., Macphee, D. E., Chudek, J. A., Hunter, G., Lannegrand, R., Talero, R. e Scrimgeour, S. N. (2003) - "Studies using ²⁷Al MAS NMR of AFm and AFt phases and the formation of Friedel's salt". *Cement and Concrete Research*, 33(2), pp. 177-182.

Kadam, S. D., Devikrishna, P. M. e Chowdhury, S. (2014) - "An examination of possible usage of Mumbai creek sand for making concrete – a review". *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(12), pp. 54-58

Katano, K., Takeda, N., Ishizeki, Y. e Iriya, K. (2013) - "Properties and application of concrete made with sea water and un-washed sea sand". In *Proceedings of Third International conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*.

Kaushik, S. K. e Islam, S. (1995) - "Suitability of sea water for mixing structural concrete exposed to a marine environment". *Cement and Concrete Composites*, 17(3), pp. 177-185.

Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S. e Dutta, S. C. (2017) - "A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material". *Construction and*

Building Materials, 131, pp. 721-740.

Kou, S.C., Poon, C.S. e Agrela, F. (2011) - "Comparisons of natural and RACs prepared with the addition of different mineral admixtures". *Cement and Concrete Composites*, 33, pp. 788-795.

Kou, S. C. e Poon, C. S. (2012) - "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate". *Construction and Building Materials*, 35, pp. 69-76.

Kou, S. C. e Poon, C. S. (2013) - "Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash". *Cement and Concrete Composites*, 37, pp. 12-19.

Kucche, K. J., Jamkar, S. S. e Sadgir, P. A. (2015) - "Quality of water for making concrete: a review of literature". *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(1), pp. 1-10.

Kumar, R. (2017) - "Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete". *Construction and Building Materials*, 142, pp. 248-255.

Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J. e Sulieman, M. Z. (2012) - "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties". *Construction and Building Materials*, 26(1), pp. 565-573.

Lee, N. K. e Lee, H. K. (2013) - "Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature". *Construction and Building Materials*, 47, pp. 1201-1209.

Li, J., Xiao, H. e Zhou, Y. (2009) - "Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials*, 23(3), pp. 1287-1291.

Li, Q., Geng, H., Shui, Z. e Huang, Y. (2015) - "Effect of metakaolin addition and seawater mixing on the properties and hydration of concrete". *Applied Clay Science*, 115, pp. 51-60.

Li, H., Farzadnia, N. e Shi, C. (2018) - "The role of seawater in interaction of slag and silica fume with cement in low water-to-binder ratio pastes at the early age of hydration". *Construction and Building Materials*, 185, pp. 508-518.

Li, L. G., Chen, X. Q., Chu, S. H., Ouyang, Y. e Kwan, A. K. H. (2019) - "Seawater cement paste: Effects of seawater and roles of water film thickness and superplasticizer dosage". *Construction and Building Materials*, 229, 116862.

Liu, J., Qiu, Q., Xing, F. e Pan, D. (2014) - "Permeation properties and pore structure of surface layer of fly ash concrete". *Materials*, 7(6), pp. 4282-4296.

Liu, J., Ou, G., Qiu, Q., Chen, X., Hong, J. e Xing, F. (2017) - "Chloride transport and microstructure of concrete with/without fly ash under atmospheric chloride condition". *Construction and Building Materials*, 146, pp. 493-501

Liu, J., Wang, X., Qiu, Q., Ou, G. e Xing, F. (2017) - "Understanding the effect of curing age on the

chloride resistance of fly ash blended concrete by rapid chloride migration test". *Materials Chemistry and Physics*, 196, pp. 315-323.

Luo, R., Cai, Y., Wang, C. e Huang, X. (2003) - "Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete". *Cement and Concrete Research*, 33(1), pp. 1-7.

Lydon, F. D. e Balendran, R. V. (1986) - "Some observations on elastic properties of plain concrete". *Cement and Concrete Research*, 16(3), pp. 314-324.

Malhotra, V. M. (1976) - "Testing hardened concrete: nondestructive methods". *American Concrete Institute*, 9.

Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M. e Ignjatović, I. (2010) - "Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete". *Waste Management*, 30(11), pp. 2255-2264.

Martínez-Lage, I., Martínez-Abella, F., Vázquez-Herrero, C. e Pérez-Ordóñez, J. L. (2012) - "Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate". *Construction and Building Materials*, 37, pp. 171-176.

Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A. e Valverde-Espinosa, I. (2011) - "Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08". *Construction and Building Materials*, 25(2), pp. 742-748.

Mas, B., Cladera, A., Del Olmo, T. e Pitarch, F. (2012) - "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use". *Construction and Building Materials*, 27(1), pp. 612-622.

Matias, D., De Brito, J., Rosa, A. e Pedro, D. (2013) - "Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers". *Construction and Building Materials*, 44, pp. 101-109.

Medina, C., Zhu, W., Howind, T., de Rojas, M. I. S. e Frías, M. (2014) - "Influence of mixed recycled aggregate on the physical – mechanical properties of recycled concrete". *Journal of Cleaner Production*, 68, pp. 216-225.

Mehta, P. K. e Monteiro, P. J. (2014) - "Concrete: microstructure, properties, and materials". McGraw-Hill Education.

Montanari, L., Suraneni, P., Tsui-Chang, M., Khatibmasjedi, M., Ebead, U., Weiss, J. e Nanni, A. (2019) - "Hydration, pore solution, and porosity of cementitious pastes made with seawater". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8), 04019154.

Nagabhushana, D., Dharmaraj Hebbal, N. A., Deepak, S. e Kumar, M. (2017) - "Effect of salt water on compressive strength of concrete". *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(5), 2687 p.

- Neville, A.** (1995) - "Chloride attack of reinforced concrete: an overview". *Materials and Structures*, 28(2), pp. 63-70.
- Newman, K.** (1968) - "Sea-dredged aggregates for concrete". In: *Proceedings of the symposium: sea-dredged aggregates for concrete*. Sand and Gravel Association of Great Britain, Buckinghamshire, UK.
- Nishibayashi, S., Yamura, K. e Inoue, S.** (1980) - "Durability of Concrete in Sea Water: Method of Accelerated Testing and Evaluation". *Special Publication*, 65, pp. 351-378.
- Nishida, T., Otsuki, N., Ohara, H., Garba-Say, Z. M. e Nagata, T.** (2015) - "Some considerations for applicability of seawater as mixing water in concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), B4014004.
- Oikonomou, N. D.** (2005) - "Recycled concrete aggregates". *Cement and Concrete Composites*, 27, pp. 315-318.
- Otsuki, N.** (1985) - "Research on the influence of chloride on corrosion of the embedded steel bars in concrete". *Rep. of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport*, 24(3), pp. 183-185.
- Otsuki, N., Saito, T. e Tadokoro, Y.** (2011) - "Possibility of sea water as mixing water in concrete". In *36th Conference on Our World in Concrete e Structures, Singapore (Vol. 36, pp. 131-138)*.
- Otsuki, N., Nishida, T., Yi, C., Nagata, T. e Ohara, H.** (2014) - "Effect of blast furnace slag powder and fly ash on durability of concrete mixed with seawater". *4th International Conference on Durability of Concrete Structures*, pp. 229-241.
- Parthasarathy, P., Hanif, A., Shao, H. e Li, Z.** (2017) - "Microstructural and morphological studies of ordinary Portland cement paste and fly ash based geopolymer in the presence of chloride ions". *Construction Materials and Systems*, 623.
- Pepe, M., Koenders, E. A., Faella, C. e Martinelli, E.** (2014) - "Structural concrete made with recycled aggregates: Hydration process and compressive strength models". *Mechanics Research Communications*, 58, pp. 139-145.
- Pereira, L.** (2002) - "Reciclagem de resíduos de construção e demolição: aplicação à Zona Norte de Portugal". *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães*.
- Pereira, P., Evangelista, L. e De Brito, J.** (2012) - "The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates". *Cement and Concrete Composites*, 34(9), pp. 1044-1052.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H. e Kou, S. C.** (2004) - "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete". *Cement and Concrete Research*, 34(1), pp. 31-36.

- Rahal, K.** (2007) - "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate". *Building and Environment*, 42(1), pp. 407-415.
- Rahal, K. N. e Alrefaei, Y. T.** (2017) - "Shear strength of longitudinally reinforced recycled aggregate concrete beams". *Engineering Structures*, 145, pp. 273-282.
- Rahal, K. N. e Alrefaei, Y. T.** (2018) - "Shear strength of recycled aggregate concrete beams containing stirrups". *Construction and Building Materials*, 191, pp. 866-876.
- Shayan, A., Xu, A., Chirgwin, G. e Morris, H.** (2010) - "Effects of seawater on AAR expansion of concrete". *Cement and Concrete Research*, 40(4), pp. 563-568.
- Shi, Z., Shui, Z., Li, Q. e Geng, H.** (2015) - "Combined effect of metakaolin and sea water on performance and microstructures of concrete". *Construction and Building Materials*, 74, pp. 57-64.
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L. e Xie, Z.** (2016) - "Performance enhancement of recycled concrete aggregate – a review". *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 466-472.
- Sikora, P., Cendrowski, K., ELrahman, M. A., Chung, S.-Y., Mijowska, E. e Stephan, D.** (2020) - "The effects of seawater on the hydration, microstructure and strength development of Portland cement pastes incorporating colloidal silica". *Applied Nanoscience*, 10, pp. 2627-2638.
- Silva, R. V., de Brito, J. e Dhir, R. K.** (2014) - "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production". *Construction and Building Materials*, 65, pp. 201-217.
- Silva, R. V., De Brito, J. e Dhir, R. K.** (2018) - "Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review". *Construction and Building Materials*, 178, pp. 19-31.
- Singh, N. e Singh, S. P.** (2018) - "Carbonation resistance of self-compacting recycled aggregate concretes with silica fume". *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 7(4), pp. 214-238.
- Soares, D., De Brito, J., Ferreira, J. e Pacheco, J.** (2014) - "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance". *Construction and Building Materials*, 71, pp. 263-272.
- Stark, D.** (2002) - "Performance of concrete in sulfate environments". R&D Serial No. 129. Skokie, IL: Portland Cement Association (PCA).
- Suryavanshi, A. K., Scantlebury, J. D. e Lyon, S. B.** (1996) - "Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tri-calcium aluminate". *Cement and Concrete Research*, 26(5), pp. 717-727.
- Swamy, R.N.** (1991) - "The alkali-silica reaction in concrete." London: Spon Press.
- Tabsh, S. W. e Abdelfatah, A. S.** (2009) - "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete". *Construction and Building Materials*, 23(2), pp. 1163-1167.
- Teng, J.-G., Xiang, Y., Yu, T. e Fang, Z.** (2019) - "Development and mechanical behaviour of ultra-

high-performance seawater sea-sand concrete". *Advances in Structural Engineering*, Vol. 22(14), pp. 3100-3120.

Thomas, M. D. A., Hooton, R. D., Scott, A. e Zibara, H. (2012) - "The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste". *Cement and Concrete Research*, 42(1), pp. 1-7.

Unite Nations Environment Programme. (2021) - "Global status report for building and construction: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector".

Wang, J., Liu, E. e Li, L. (2018) - "Multiscale investigations on hydration mechanisms in seawater OPC paste". *Construction and Building Materials*, 191, pp. 891-903.

Wang, T. K., Wu, Z. e Luo, C. (2021) - "Multi-participant construction waste demolition and transportation decision-making system". *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105575.

Wegian, F. M. (2010) - "Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete". *The IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*, 3(4), pp. 235-243.

Xiao, J., Qiang, C., Nanni, A. e Zhang, K. (2017) - "Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities". *Construction and Building Materials*, 155, pp. 1101-1111.

Xu, Y. (1997) - "The influence of sulphates on chloride binding and pore solution chemistry". *Cement and Concrete Research*, 27(12), pp. 1841-1850.

Xu, G., Shen, W., Zhang, B., Li, Y., Ji, X. e Ye, Y. (2018) - "Properties of recycled aggregate concrete prepared with scattering-filling coarse aggregate process". *Cement and Concrete Composites*, 93, pp. 19-29.

Xu, Q., Ji, T., Yang, Z. e Ye, Y. (2019) - "Preliminary investigation of artificial reef concrete with sulphoaluminate cement, marine sand and sea water". *Construction and Building Materials*, 211, pp. 837-846.

Yang, K. H., Chung, H. S. e Ashour, A. F. (2008) - "Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties". *ACI Materials Journal*, 105, 289 p.

Yang, Y., Ji, T., Lin, X., Chen, C. e Yang, Z. (2018) - "Biogenic sulfuric acid corrosion resistance of new artificial reef concrete". *Construction and Building Materials*, 158, pp. 33-41.

Younis, A., Ebead, U., Suraneni, P. e Nanni, A. (2018) - "Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete". *Construction and Building Materials*, 190, pp. 276-286.

Younis, A. e Ebead, U. (2020) - "Effects of using seawater and recycled coarse aggregates on plain concrete characteristics". *International Conference on Civil Infrastructure and Construction (CIC 2020)*, Doha, Qatar.

Younis, A., Ebead, U., Suraneni, P. e Nanni, A. (2020) - "Performance of seawater-mixed recycled-

aggregate concrete”. ASCE.

Zaher, K. e Shihada, S. (2003) - “Effect of Gaza seawater on concrete strength for different exposures”. Journal of the Islamic University of Gaza, 11 (20), pp. 156-172.

Zhang, J., Shi, C., Li, Y., Pan, X., Poon, C. S. e Xie, Z. (2015) - “Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation”. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(11), 04015029.

Documentos Normativos - Normas e Regulamentos

DIN 52108 (2010) - “Testing of Inorganic Non-metallic Materials—Wear Test Using the Grinding Wheel According to Bohme”. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Germany.

LNEC E 237 (1970) - “Agregados: Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles.” LNEC, Lisboa, Portugal.

LNEC E 397 (1993) - “Betões: Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão”. LNEC, Lisboa, Portugal.

NP EN 933-1 (2000) - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: análise granulométrica. Método de peneiração.” Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 16 p.

NP EN 933-2 (1999) - “Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 7 p.

NP EN 933-11 (2011) - “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 11: ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 14 p.

NP EN 1097-2 (2000) - “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: métodos para a determinação da resistência à fragmentação”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 36 p.

NP EN 1097-3 (2003) - “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: determinação da baridade e do volume de vazios”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 16 p.

NP EN 1097-6 (2003) - “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água.” Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 33 p.

NP EN 12350-2 (2002) - “Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 12350-6 (2002) - “Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 13 p.

NP EN 12390-3 (2009) - “Ensaio do betão endurecido. Parte 3: resistência à compressão de provetes”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 21 p.

NP EN 12390-6 (2003) - “Ensaio de betão endurecido. Parte 6: resistência à tração por compressão de provetes”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 12504-4 (2007) - “Ensaio de betão nas estruturas. Parte 4: determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

Anexo A - Fichas de materiais utilizados

Anexo A1 - Características do cimento Portland CEM I 42,5 R

QUALIDADE BEM CIMENTADA | PRODUTOS E SERVIÇOS



GAMA DE PRODUTOS

SUPRATEK CEM I 42,5 R CIMENTO PORTLAND

Cimento cinzento de elevada resistência inicial e final, para o fabrico de betão estrutural ou pré-esforço, caldas de injeção e para a pré-fabricação ligeira com pré-esforço.



DOMÍNIO DE APLICAÇÃO

- | Betão estrutural de elevada resistência (C30/37 a C40/55)
- | Betões leves de elevada resistência
- | Betão pré-esforçado a idades jovens
- | Pré-fabricação ligeira pré-esforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas
- | Betão aplicado em tempo frio
- | Caldas de selagem e injeção
- | Cimento de referência para a produção de betões sujeitos à acção do dióxido de carbono (carbonatação)
- | Cimento de referência para a produção de betões sujeitos à acção do gelo/degelo

CARACTERÍSTICAS

- | Elevada resistência mecânica (inicial e final)
- | Calor de hidratação elevado (betão)
- | Muito sensível ao processo de cura (betão)
- | Permite adições de hidraulicidade latente
- | A utilização de adjuvantes químicos é compatível com este cimento.

FICHA TÉCNICA

CLÍNQUER:	≥ 95%
OUTROS CONSTITUINTES:	≤ 5%
R2D:	≥ 20 MPa
R28D:	≥ 42,5 MPa e ≤ 62,5 MPa
TEOR DE SULFATOS (EM SO ₃):	≤ 4,0%
TEOR DE CLORETOS:	≤ 0,10%
PRINCÍPIO DE PRESA:	≥ 60 min
EXPANSIBILIDADE:	≤ 10 mm
NORMA:	EN 197-1
COR:	Cinzento
EMBALAGEM:	Granel Saco 25kg
FÁBRICAS:	SECIL-Outão/Maceira-Liz

Figura A1 - Ficha técnica do cimento Portland CEM I 42,5 R

Anexo A2 - Ficha técnica do superplastificante



FICHA DE DADOS DO PRODUTO

SikaPlast® -717

Superplastificante / Forte redutor de água para betão

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

SikaPlast®-717 é um superplastificante para betão e argamassa especialmente indicado para centrais de betão pronto com grande variação a nível de finos (nomeadamente cimentos, adições e agregados).

UTILIZAÇÕES

SikaPlast®-717 permite obter uma forte redução de água aliado a uma excelente manutenção de consistência. Especialmente indicado para condições agressivas a nível de ligantes e temperaturas elevadas.

SikaPlast®-717 permite o fabrico de:

- Betão com forte plastificação
- Betão com transporte longo, betonagens demoradas e temperaturas altas
- Betão com forte redução de água permitindo obter-se betões com resistências elevadas e permeabilidade baixa
- Betão de classe de resistência média e alta, com qualquer consistência, nos quais se pretenda obter uma economia grande de cimento

CARACTERÍSTICAS / VANTAGENS

SikaPlast®-717 confere ao betão as seguintes propriedades:

- Maior robustez contra variações nos agregados e/ou diferentes tipos de cimento
- Manutenção da trabalhabilidade bastante favorável
- Alta redução de água, mesmo em baixas dosagens
- Aumento das resistências mecânicas
- Permeabilidade muito baixa
- Acabamento superficial de grande qualidade
- Isento de cloretos

CERTIFICADOS / NORMAS

Adjuvante para betão de acordo com a EN 934-2, Quadro 3.1/3.2 e fornecido com marcação CE.

DADOS DO PRODUTO

Base química	Combinação de dispersantes orgânicos sintéticos em base aquosa
Fornecimento	242 kg (bidão); 1210 kg (IBC)
Aspecto / Cor	Líquido castanho escuro
Tempo de armazenamento	O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico
Armazenagem e conservação	Armazenado nas embalagens originais não encetadas e não deterioradas em ambiente seco e a temperatura entre +5 °C e +35 °C. Proteger da luz solar direta.
Massa volúmica	1,21 ± 0,03 kg/l (a +20 °C)
Valor do pH	10,0 ± 1,0
Teor de iões cloreto	< 0,1 %

Ficha de Dados do Produto
SikaPlast®-717
Janeiro 2021, Versão 01.01
02136201100000943

1 / 3

DADOS TÉCNICOS

Guia de betonagem SikaPlast®-717 permite o fabrico de betão de qualidade, daí que devam ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a betonagem e a cura do betão.

INFORMAÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO

Dosagem recomendada	Conforme o objetivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens: • Em betões correntes: 0,4% a 1,2% sobre o peso do cimento. Em betões mais difíceis (temperaturas elevadas e/ou transportes e/ou colocações mais longos), pode ser aumentada a dosagem até ao máximo de 1,7% sobre o peso do cimento, mas só depois da realização de ensaios prévios.
Compatibilidade	SikaPlast®-717 pode ser combinado com os seguintes produtos: • Sika® Ferrogard® 901 • Sika® Pump • Sika® Rapid 1 • Sikacrete® Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.

VALOR BASE

Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.

OBSERVAÇÕES

- Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem ótima do adjuvante e sempre que se altere a composição do betão.
 - Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se.
- Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.

ECOLOGIA, SAÚDE E SEGURANÇA

Para informação e aconselhamento sobre o manuseamento seguro, armazenamento e eliminação de produtos químicos, os utilizadores devem consultar as respectivas Fichas de Dados de Segurança (FDS) mais recentes contendo os dados físicos, ecológicos, toxicológicos e outros relacionados com a segurança.

INSTRUÇÕES DE APLICAÇÃO

DISPENSADOR

Preparar o betão com cerca de 2/3 da água prevista e adicionar o adjuvante misturando aprox. 1 minuto/m³, adicionar água até à consistência desejada – aproveitamento máximo do adjuvante e controlo da razão água/ligante. Se o processo não for viável adicionar o produto à água de amassadura determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogênea. Não adicionar o adjuvante aos componentes secos (redução de eficácia).

No caso de redosagem em obra: diluição ligeira do adjuvante para reduzir a sua viscosidade e facilitar a incorporação. "Puxar" o betão acima e adicionar lentamente o adjuvante, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneizar. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.

RESTRICÇÕES LOCAIS

Por favor, ter em atenção que o desempenho deste produto poderá variar ligeiramente de país para país, em função dos parâmetros regulamentares específicos de cada local. Por favor, consultar a Ficha de Produto para a descrição completa dos campos de aplicação.

Ficha de Dados do Produto
SikaPlast®-717
Janeiro 2021, Versão 01.01
02136201100000943

2 / 3



Figura A2 - Ficha técnica do superplastificante

Anexo A3 - Ficha de certificação das areias naturais

GRUPO SOARVAMIL

FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

CE 1515 1515 CPD-0014
Herdade Mesquita **04**
NP EN 12620 NP EN 13043

Produto: Areia Lavada 0/2 Mesquita Origem: Herdade da Mesquita - Sesimbra

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

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

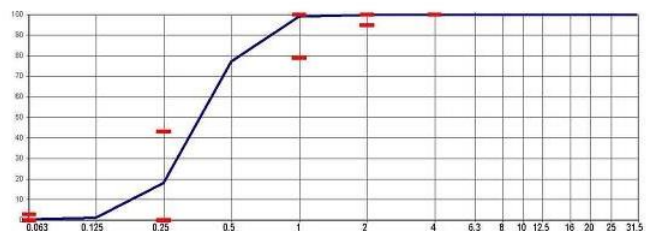
CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾				Outras características		
Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)	Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
31,5	100			Dimensão nominal (d/D)	0/2	
25	100			Granulometria	G ₈₅	G ₈₅ -G ₁₀ -20
20	100			Massa Volumica:		
16	100			- Material impermeável	2,63 Mg/m ³	
12,5	100			- Partículas secas em estufa	2,62 Mg/m ³	
10	100			- Partículas saturadas	2,62 Mg/m ³	
8	100			Absorção de água	0,2%	
6,3	100			Teor de finos	f ₅	NA
4	100	100	100	Qualidade dos finos	NA	
2	100	95	100	Teor de cloretos	≤ 0,01%	
1	99	79	100	Sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,2}	
0,5	77			Envolto total	0,04%	
0,25	18	0	43	Teor de Húmicos	Mais claro	
0,125	1			Teor de cont. orgânicos leves	DND	
0,063	0,5	0,0	3,0	Teor de carbonato de cálcio	DND	
				Retração por secagem	0,018%	
				Teor de carbonato de cálcio	DND	
				Resistência gelo/degelo	DND	
				Reactividade álcali-silica	DND	
				Resistência choque térmico	DND	

Controlo da produção			
Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	2,03	1,53	2,53
CF	2,27	1,77	2,77

¹⁾ Valores em percentagem de passados

NA-Não aplicável DND- Desempenho não determinado



Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:

[Assinatura]

Figura A3 - Ficha técnica da areia fina

GRUPO SOARVAMIL

FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

CE 1515 1515 CPD-0014
Pinhal Conde Cunha 4 **04**
NP EN 12620 NP EN 13043

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

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

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

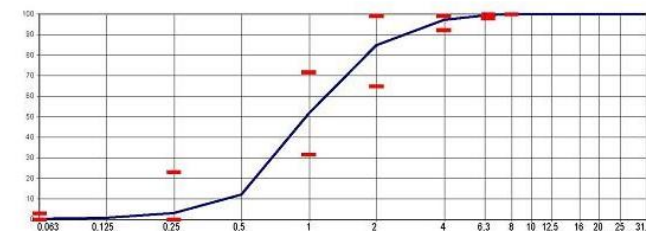
CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾				Outras características		
Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)	Característica	NP EN 12620	NP EN 13043
31,5	100			Dimensão nominal (d/D)	0/4	
25	100			Granulometria	G ₈₅	G ₉₀ -G ₁₀ -20
20	100			Massa Volumica:		
16	100			- Material impermeável	2,64 Mg/m ³	
12,5	100			- Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m ³	
10	100			- Partículas saturadas	2,62 Mg/m ³	
8	100	100	100	Absorção de água	0,5%	
6,3	100	98	100	Teor de finos	f ₅	NA
4	97	92	99	Qualidade dos finos	NA	
2	85	65	99	Teor de cloretos	≤ 0,01%	
1	52	32	72	Sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,2}	
0,5	12			Envolto total	0,07%	
0,25	3	0	23	Teor de Húmicos	Mais claro	
0,125	1			Teor de cont. orgânicos leves	DND	
0,063	0,4	0,0	3,0	Teor de carbonato de cálcio	DND	
				Retração por secagem	0,020%	
				Teor de carbonato de cálcio	DND	
				Resistência gelo/degelo	DND	
				Reactividade álcali-silica	DND	
				Resistência choque térmico	DND	

Controlo da produção			
Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,49	2,99	3,99
CF	3,81	3,31	4,31

¹⁾ Valores em percentagem de passados

NA-Não aplicável DND-Desempenho não determinado



Data: 02 / 01 / 2007

O Director Produção:

[Assinatura]

Figura A4 - Ficha técnica da areia grossa

Anexo A4 - Fichas de certificação das britas

FP SZ 120901-AGSI 2012-04-04

Pedreira de Origem: **Sanchez, SA, Sesimbra**
Nome Comercial: **Brita 1**



0866
Sanchez, S.A.
Santana, 2979-908 Sesimbra
06
0866 - CPD - 2006/CE.0053

APLICAÇÃO

Agregados para betão;
Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

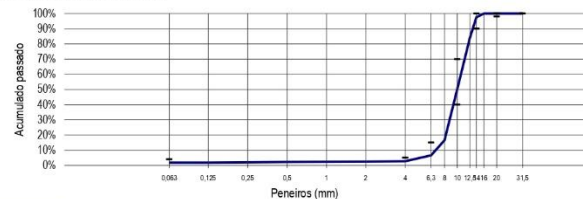
Designação de acordo com a EN 12620:2002 + A1:2008; 6/14

Designação de acordo com a EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004; 6/14

Propriedade	Método de ensaio	Valor	Notas (Norma de referência)
Descrição petrográfica	NP EN 932-3	Estrutura – Compacta Superfície – Compacta Porosidade – Média a Baixa Rocha sedimentar carbonatada - Calcário	—
Dimensão dos agregados	NP EN 933-1	6/14	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Categoria e tolerâncias nos peneiros intermédios		G _c 90/15 G ₁ 15	EN 12620:2002 + A1:2008
		G _c 90/15 G _{20/15}	EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Teor de finos		f ₄	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Absorção de água	NP EN 1097-6	0,9% - 1,9%	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Massa volúmica (I/Se/Sa) (±0,07)		2,77/2,69/2,70Mg/m ₃	
Equivalente de areia	NP EN 933-8	SE≥40	
Resistência à fragmentação ⁽²⁾	NP EN 1097-2	LA ₃₀	
Reactividade Alcalis Silica ⁽¹⁾	ASTM C1260-1	Classe I	
Retração por secagem ⁽¹⁾	EN 1367-4	0,025%	
Teor de Húmus ⁽¹⁾		Isento	
Teor total de Enxofre ⁽¹⁾	NP EN 1744-1	≤0,03%	
Cloretos solúveis ⁽¹⁾		≤0,02%	

⁽¹⁾ Cálculo da Média dos ensaios

GRANULOMETRIA DECLARADA



Sanchez, S.A. Serra da Achada Apartado 1010 Santana
[2970 908 Sesimbra | Tel 212681380 | Fax 212681763
Sanchez@cimpor.com | www.cimpor-portugal.pt
NPC 501237263

Figura A6 - Ficha técnica da brita 1

FP 120911-AGSI 2012-04-04

Pedreira de Origem: **Sanchez, SA, Sesimbra**
Nome Comercial: **Brita 2**



0866
Sanchez, S.A.
Santana, 2979-908 Sesimbra
06
0866 - CPD - 2006/CE.0053

APLICAÇÃO

Agregados para betão;
Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

Designação de acordo com a EN 12620:2002 + A1:2008; 11/22

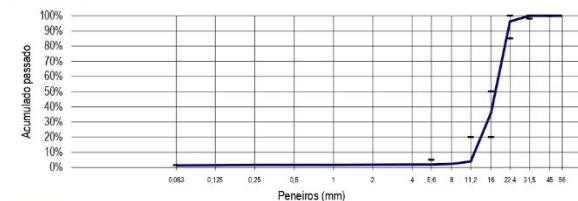
Designação de acordo com a EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004; 11/22

Propriedade	Método de ensaio	Valor	Notas (Norma de referência)
Descrição petrográfica	NP EN 932-3	Estrutura – Compacta Superfície – Compacta Porosidade – Média a Baixa Rocha sedimentar carbonatada - Calcário	—
Dimensão dos agregados	NP EN 933-1	11/22	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Categoria e tolerâncias nos peneiros intermédios		G _c 85/20	EN 12620:2002 + A1:2008
		G _c 85/20	EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Teor de finos		f _{1,5} f ₂	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Absorção de água	NP EN 1097-6	0,5% - 1,5%	EN 12620:2002 + A1:2008 EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004
Massa volúmica (I/Se/Sa) (±0,05)		2,70/2,66/2,64Mg/m ₃	
Reactividade Alcalis Silica ⁽¹⁾	ASTM C1260-1	Classe I	
Resistência à fragmentação ⁽¹⁻²⁾	NP EN 1097-2	LA ₃₀	
Retração por Secagem ⁽¹⁾	EN 1367-4	0,025%	
Teor de Húmus ⁽¹⁾	NP EN 1744-1	Isento	
Teor total de Enxofre ⁽¹⁾	NP EN 1744-1	≤0,03%	
Cloretos solúveis ⁽¹⁾		≤0,02%	

⁽¹⁾ Por extrapolação de resultados de outro agregado

⁽²⁾ Cálculo da Média dos ensaios

GRANULOMETRIA DECLARADA



Sanchez, S.A. Serra da Achada Apartado 1010 Santana
[2970 908 Sesimbra | Tel 212681380 | Fax 212681763
Sanchez@cimpor.com | www.cimpor-portugal.pt
NPC 501237263

Figura A5 - Ficha técnica da brita 2

Anexo B - Calendarização da campanha experimental

Legenda	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro
---------	-------	------	-------	-------	--------	----------

		1a Betonagem											
		S-CP-0	S-CS-0	P-CP-0	P-CS-0	P-CP-100	P-CS-100	S-CP-100	S-CS-100	P-CP-50	P-CS-50	S-CS-50	S-CP-50
7 dias	Betonagem	12/04/2022	13/04/2022	19/04/2022	21/04/2022	27/04/2022	29/04/2022	02/05/2022	09/05/2022	01/06/2022	02/06/2022	02/06/2022	03/06/2022
	Resistência à compressão Ultra-sons	19/04/2022	20/04/2022	26/04/2022	28/04/2022	04/05/2022	06/05/2022	09/05/2022	16/05/2022	08/06/2022	09/06/2022	09/06/2022	10/06/2022
28 dias	Resistência à compressão	10/05/2022	11/05/2022	17/05/2022	19/05/2022	25/05/2022	27/05/2022	30/05/2022	06/06/2022	29/06/2022	30/06/2022	30/06/2022	01/07/2022
	Ultra-sons												
	Resistência à compressão em cilindros												
	Resistência à tracção por compressão diametral												
	Módulo de elasticidade												
91 dias	Resistência à compressão	12/07/2022	13/07/2022	19/07/2022	21/07/2022	27/07/2022	29/07/2022	01/08/2022	08/08/2022	31/08/2022	01/09/2022	01/09/2022	02/09/2022
	Ultra-sons												
	Resistência à abrasão												
		2a Betonagem											
		S-CP-100	S-CS-100	P-CS-100	P-CP-0	P-CS-0	P-CP-100	S-CS-0	S-CP-0	P-CP-50	P-CS-50	S-CS-50	S-CP-50
28 dias	Betonagem	10/05/2022	11/05/2022	12/05/2022	16/05/2022	17/05/2022	17/05/2022	18/05/2022	19/05/2022	06/06/2022	07/06/2022	07/06/2022	08/06/2022
	Resistência à compressão em cilindros	07/06/2022	08/06/2022	09/06/2022	13/06/2022	14/06/2022	14/06/2022	15/06/2022	16/06/2022	04/07/2022	05/07/2022	05/07/2022	06/07/2022
	Resistência à tracção por compressão diametral												
Módulo de elasticidade													
91 dias	Resistência à compressão	09/08/2022	10/08/2022	11/08/2022	15/08/2022	16/08/2022	16/08/2022	17/08/2022	18/08/2022	05/09/2022	06/09/2022	06/09/2022	07/09/2022
	Ultra-sons												

Figura B1 - Calendarização da campanha experimental

Anexo C - Resultados dos ensaios aos agregados

Anexo C1 - Análise granulométrica

Quadro C1 - Análise granulométrica

Peneiro (mm)	AN finos		AN grossos	
	Areia fina	Areia grossa	Brita 1	Brita 1
	Valor passado acumulado médio (%)			
0	0,02	0,05	0,05	0,02
0,063	16,61	2,21	0,29	0,38
0,125	21,63	2,58	0,30	0,82
0,25	73,53	6,56	0,31	1,00
0,5	98,67	26,17	0,37	1,22
1	99,92	76,51	0,45	1,66
2	100,00	100,00	5,09	2,57
4	100,00	100,00	8,99	3,57
5,6	100,00	100,00	43,40	5,86
8	100,00	100,00	94,45	15,79
11,2	100,00	100,00	100,00	82,58
16	100,00	100,00	100,00	100,00
22,4	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00
63	100,00	100,00	100,00	100,00

Anexo C2 - Absorção de água

Quadro C2 - Absorção de água

	M ₂ (g)	M ₃ (g)	M _{1'} (g)	M ₁ (g)	M ₄ (g)	M ₀ (g)
Brita 2	5102,6	3080,5	3909,8	3256,4	3208,4	653,4
Brita 1	2761,7	1675,9	2173,2	1747,1	1725,5	426,1
Areia grossa	2311,8	1675,9	1459,8	1033,7	1026,9	426,1
Areia fina	2298,2	1675,9	1439,5	1013,4	1010,3	426,1
AR	6608,1	5097,3		2581,3	2434,6	

Anexo C3 - Evolução da absorção de água dos AR grossos

Quadro C3 - Evolução da absorção de água dos AR grossos

t (h:mm:ss)	m _t (g)	A _i (g)	W _{Ai} (%)	W _{Atr} (%)
0:00:00	1112,0	0,0	0,0	0,0
0:01:00	1159,5	47,5	66,9	4,0
0:03:00	1168,5	56,5	79,6	4,8
0:04:00	1169,9	57,9	81,5	4,9
0:05:00	1170,5	58,5	82,4	4,9
0:06:00	1171,0	59,0	83,1	5,0
0:07:00	1171,4	59,4	83,7	5,0
0:08:00	1171,8	59,8	84,2	5,1
0:09:00	1172,0	60,0	84,5	5,1
0:10:00	1172,3	60,3	84,9	5,1
0:15:00	1172,8	60,8	85,6	5,1
0:20:00	1173,2	61,2	86,2	5,2
0:25:00	1173,9	61,9	87,2	5,2
0:30:00	1174,1	62,1	87,5	5,2
0:40:00	1174,6	62,6	88,2	5,3
0:50:00	1175,3	63,3	89,2	5,3
1:00:00	1175,6	63,6	89,6	5,4
1:15:00	1175,6	63,6	89,6	5,4
1:30:00	1175,6	63,6	89,6	5,4
1:45:00	1175,7	63,7	89,7	5,4
2:00:00	1175,7	63,7	89,7	5,4
3:00:00	1178,3	66,3	93,4	5,6
4:00:00	1178,3	66,3	93,4	5,6
5:00:00	1178,3	66,3	93,4	5,6
6:00:00	1178,8	66,8	94,1	5,6
24:00:00	1183,0	71,0	100,0	6,0
	m _{24:00:00} (g)	A _t (g)		W _{A24} (%)

Anexo C4 - Análise composicional

Quadro C4 - Análise composicional

Composição (em %)	AR
Betão, argamassa e pedra natural	70,8
Alvenaria - materiais argilosos	28,6
Vidro	0,5
Materiais betuminosos	0
Outros	0,1
Total	100

Anexo D - Ensaio ao betão no estado fresco

Quadro D1 - Abaixamento do cone de *Abrams*

	Abaixamento (mm)
P-0 (1)	150
P-0 (2)	150
P-0 (1)	150
P-0 (2)	150
S-0 (1)	130
S-0 (2)	120
S-0 (1)	110
S-0 (2)	110
P-50 (1)	120
P-50 (2)	120
P-50 (1)	120
P-50 (2)	115
S-50 (1)	120
S-50 (2)	120
S-50 (1)	125
S-50 (2)	115
P-100 (1)	110
P-100 (2)	120
P-100 (1)	100
P-100 (2)	110
S-100 (1)	100
S-100 (2)	120
S-100 (1)	100
S-100 (2)	100
(1) 1ª betonagem; (2) 2ª betonagem	

Quadro D2 - Massa volúmica

	M ₂ (kg)	M ₁ (kg)	D (kg/m ³)	Média (kg/m ³)
P-0	35,205	11,962	2324,3	2334,9
P-0	35,422	11,967	2345,5	
S-0	34,508	11,933	2257,5	2285,5
S-0	35,057	11,922	2313,5	
P-50	34,714	11,913	2280,1	2282,1
P-50	34,766	11,926	2284,0	
S-50	34,471	11,920	2255,1	2267,6
S-50	34,736	11,935	2280,1	
P-100	33,788	11,965	2182,3	2184,7
P-100	33,785	11,914	2187,1	
S-100	33,574	11,942	2163,2	2173,2
S-100	33,780	11,948	2183,2	

Anexo E - Resultados dos ensaios mecânicos realizados aos betões

Anexo E1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão

Quadro E1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias

BR	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)		848		848	D.P.	Variância	
	Tensão (MPa)		37,7		37,7	0,0	0,0%	
S-CP-0	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	809	819		814	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	36,0	36,4		36,2	-4%	0,2	0,6%
S-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)		696	842	769	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)		30,9	37,4	34,2	-9%	3,2	9,5%
P-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	819	814	877	837	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	36,4	36,2	39,0	37,2	-1%	1,3	3,5%
P-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	608	508	561	559	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	27,0	22,6	24,9	24,9	-34%	1,8	7,3%
P-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	526	532	555	538	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	23,4	23,6	24,7	23,9	-37%	0,6	2,4%
S-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	596	602	545	581	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	26,5	26,8	24,2	25,8	-31%	1,1	4,4%
S-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)		509	509	509	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)		22,6	22,6	22,6	-40%	0,0	0,0%
P-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	696	664	702	687	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	30,9	29,5	31,2	30,5	-19%	0,7	2,4%
P-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	649	684	666	666	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	28,8	30,4	29,6	29,6	-21%	0,6	2,1%
S-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	743	666	737	715	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	33,0	29,6	32,7	31,8	-16%	1,5	4,8%
S-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	713	725	678	705	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	31,7	32,2	30,1	31,3	-17%	0,9	2,8%

Quadro E2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

BR	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	989	1015	988	997	D.P.	Variância	
		Tensão (MPa)	43,9	45,1	43,9	44,3	0,6	1,3%
S-CP-0	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	977	942	965	961	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	43,4	41,9	42,9	42,7	-4%	0,6	1,5%
S-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	977	965	923	955	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	43,4	42,9	38,9	41,7	-6%	2,0	4,8%
P-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	1000	935	953	963	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	44,5	41,6	42,4	42,8	-3%	1,2	2,9%
P-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)		637	666	666	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)		28,3	29,6	29,6	-33%	0,0	0,0%
P-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	719	661	695	661	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	32,0	29,4	30,9	29,4	-34%	0,0	0,0%
S-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	712	754	748	733	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	31,6	33,5	33,3	32,6	-26%	0,9	2,9%
S-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	655	661	666	660	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	29,1	29,4	29,6	29,3	-34%	0,2	0,7%
P-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	913	913	913	913	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	40,6	40,6	40,6	40,6	-9%	0,0	0,0%
P-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	889	877	901	889	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	39,5	39,0	40,0	39,5	-11%	0,4	1,1%
S-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	948	872	883	877	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	42,1	38,7	39,3	39,0	-12%	0,3	0,7%
S-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	854	924	918	899	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	37,9	41,1	40,8	39,9	-10%	1,4	3,5%

Quadro E3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 91 dias

BR	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	1114	1123	1205	1147	D.P.	Variância	
		Tensão (MPa)	49,5	49,9	53,6	51,0	1,8	3,6%

S-CP-0	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	1106	1117		1112	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	49,1	49,7		49,4	-3%	0,3	0,5%
S-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	1071	1085	1076	1077	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	47,6	48,2	47,8	47,9	-6%	0,3	0,6%
P-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	1223	1153	1153	1153	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	54,3	51,2	51,2	51,2	0%	1,5	2,9%
P-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	892	934	959	929	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	39,6	41,5	42,6	41,3	-19%	1,2	3,0%
P-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	854	848		851	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	37,9	37,7		37,8	-26%	0,1	0,3%
S-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	848	889		869	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	37,7	39,5		38,6	-24%	0,9	2,4%
S-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	883	835		859	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	39,2	37,1		38,2	-25%	1,1	2,8%
P-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	1012	1030	1082	1041	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	45,0	45,8	48,1	46,3	-9%	1,3	2,9%
P-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	995	1012	1059	1022	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	44,2	45,0	47,1	45,4	-11%	1,2	2,7%
S-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	1000	1000	971	990	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	44,5	44,4	43,2	44,0	-14%	0,6	1,4%
S-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Força (kN)	965	930	959	951	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	42,9	41,3	42,6	42,3	-17%	0,7	1,6%

Anexo E2 - Resultados do ensaio de resistência à tração

Quadro E4 - Resultados do ensaio de resistência à tração aos 28 dias

BR	Provete	1	2	Média			
	Força (N)	256	269	263	D.P.	Variância	
	Tensão (MPa)	3,6	3,8	3,7	0,1	2,5%	
S-CP-0	Provete	1	2	Média			
	Força (N)		204	204	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)		2,9	2,9	-22%	0,0	0,0%

S-CS-0	Provete	1	2	Média			
	Força (N)	192		192	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	2,7		2,7	-27%	0,0	0,0%
P-CS-0	Provete	1	2	Média			
	Força (N)		245	245	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)		3,5	3,5	-7%	0,0	0,0%
P-CP-100	Provete	1	2	Média			
	Força (N)	157		157	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	2,2		2,2	-40%	0,0	0,0%
P-CS-100	Provete	1	2	Média			
	Força (N)	128	122	125	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	1,8	1,7	1,8	-52%	0,0	2,3%
S-CP-100	Provete	1	2	Média			
	Força (N)	145	139	142	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	2,1	2,0	2,0	-46%	0,0	2,1%
S-CS-100	Provete	1	2	Média			
	Força (N)	154	157	155	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	2,2	2,2	2,2	-41%	0,0	0,9%
P-CP-50	Provete	1	2	Média			
	Força (N)	189	186	188	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	2,7	2,6	2,7	-29%	0,0	0,8%
P-CS-50	Provete	1	2	Média			
	Força (N)	180	169	174	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	2,6	2,4	2,5	-34%	0,1	3,4%
S-CS-50	Provete	1	2	Média			
	Força (N)		163	163	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)		2,3	2,3	-38%	0,0	0,0%
S-CP-50	Provete	1	2	Média			
	Força (N)	179	186	183	Var. AC	D.P.	Variância
	Tensão (MPa)	2,5	2,6	2,6	-30%	0,0	1,9%

Anexo E3 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade

Quadro E5 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade aos 28 dias

BR	Provete	1	Média	D.P.	Variância		
	E (GPa)	40,7	40,7	0,0	0,0%		
S-CP-0	Provete	1	2	Média	Var. AC	D.P.	Variância
	E (GPa)	38,8	39,0	38,9	-4%	0,1	0,2%
S-CS-0	Provete	1	2	Média			
	E (GPa)	39,0	38,3	38,6	-5%	0,3	0,9%
P-CS-0	Provete	1	Média	Média			
	E (GPa)	40,3		40,3	-1%	0,0	0,0%
P-CP-100	Provete	1		Média			
	E (GPa)	26,1		26,1	-36%	0,0	0,0%
P-CS-100	Provete	1		Média			
	E (GPa)	25,0		25,0	-39%	0,0	0,0%
S-CP-100	Provete	1		Média			
	E (GPa)	24,5		24,5	-40%	0,0	0,0%

S-CS-100	Provete	1		Média			
	E (GPa)	23,3	24,2	23,7	-42%	0,5	2,1%
P-CP-50	Provete	1		Média			
	E (GPa)	31,2		31,2	-23%	0,0	0,0%
P-CS-50	Provete	1		Média			
	E (GPa)	32,2		32,2	-21%	0,0	0,0%
S-CS-50	Provete	1		Média			
	E (GPa)	30,9		30,9	-24%	0,0	0,0%
S-CP-50	Provete	1		Média			
	E (GPa)	30,8		30,8	-24%	0,0	0,0%

Anexo E4 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão

Quadro E6 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão

BR(P-CP-0)								
PONTOS	PROVETE 1				PROVETE 2			
	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	47,70	46,43	1,27	2,7%	48,56	45,84	2,72	5,6%
P2	47,62	46,15	1,47	3,1%	48,57	46,32	2,25	4,6%
P3	47,17	45,98	1,19	2,5%	48,39	46,36	2,03	4,2%
P4	47,93	45,96	1,97	4,1%	48,58	46,17	2,41	5,0%
P5	47,18	45,60	1,58	3,3%	48,52	46,08	2,44	5,0%
P6	47,20	45,71	1,49	3,2%	48,56	46,42	2,14	4,4%
P7	47,64	45,62	2,02	4,2%	48,59	45,86	2,73	5,6%
P8	47,33	45,54	1,79	3,8%	48,57	45,89	2,68	5,5%
P9	46,87	45,33	1,54	3,3%	48,25	46,19	2,06	4,3%
Média	47,40	45,81	1,59	3,4%	48,51	46,13	2,38	4,9%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	512,1	496,8	15,3		536,3	511,8	24,5	4,6%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	4,6%				

P-CP-50								
PONTOS	PROVETE 1				PROVETE 2			
	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	50,96	49,12	1,8	3,6%	51,70	49,53	2,2	4,2%
P2	51,22	49,42	1,8	3,5%	51,52	49,45	2,1	4,0%
P3	51,49	49,86	1,6	3,2%	51,37	49,34	2,0	4,0%
P4	51,83	49,12	2,7	5,2%	51,38	49,61	1,8	3,4%
P5	51,94	49,01	2,9	5,6%	50,92	49,25	1,7	3,3%
P6	51,80	49,49	2,3	4,5%	50,91	49,32	1,6	3,1%
P7	51,75	48,71	3,0	5,9%	51,20	49,58	1,6	3,2%
P8	51,97	49,06	2,9	5,6%	50,90	49,16	1,7	3,4%
P9	51,97	49,46	2,5	4,8%	50,64	49,06	1,6	3,1%
Média	51,66	49,25	2,4	4,7%	51,17	49,37	1,8	3,5%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	575,4	552,0	23,4	4,1%	582,1	557,5	24,6	4,2%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	4,1%				

P-CP-100								
PROVETE 1					PROVETE 2			
PONTOS	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	48,95	46,60	2,4	4,8%	48,84	46,27	2,6	5,3%
P2	48,70	46,46	2,2	4,6%	48,73	46,52	2,2	4,5%
P3	48,04	46,31	1,7	3,6%	48,68	46,87	1,8	3,7%
P4	48,78	46,88	1,9	3,9%	48,96	46,60	2,4	4,8%
P5	48,38	46,66	1,7	3,6%	49,54	46,69	2,9	5,8%
P6	48,27	46,43	1,8	3,8%	48,83	46,83	2,0	4,1%
P7	48,73	46,72	2,0	4,1%	49,68	46,39	3,3	6,6%
P8	48,29	46,59	1,7	3,5%	49,51	46,65	2,9	5,8%
P9	47,90	46,47	1,4	3,0%	49,58	46,93	2,7	5,3%
Média	48,45	46,57	1,9	3,9%	49,15	46,64	2,5	5,1%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	505,8	487,8	18,0	3,6%	489,0	471,5	17,5	3,6%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	3,6%				

P-CS-0								
PROVETE 1					PROVETE 2			
PONTOS	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	47,92	47,75	0,2	0,4%	49,50	46,43	3,1	6,2%
P2	48,10	47,21	0,9	1,9%	49,07	46,68	2,4	4,9%
P3	48,30	46,80	1,5	3,1%	48,48	46,52	2,0	4,0%
P4	48,03	47,50	0,5	1,1%	49,56	46,37	3,2	6,4%
P5	48,31	47,47	0,8	1,7%	49,16	46,29	2,9	5,8%
P6	48,42	46,69	1,7	3,6%	48,75	46,31	2,4	5,0%
P7	47,78	47,35	0,4	0,9%	49,82	46,14	3,7	7,4%
P8	48,30	46,89	1,4	2,9%	49,09	46,28	2,8	5,7%
P9	48,82	46,23	2,6	5,3%	48,50	46,31	2,2	4,5%
Média	48,22	47,10	1,1	2,3%	49,10	46,37	2,7	5,6%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	526,4	498,9	27,5	5,2%	523,4	495,9	27,5	5,3%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	5,2%				

P-CS-50								
PROVETE 1					PROVETE 2			
PONTOS	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	51,15	49,45	1,7	3,3%	51,30	48,98	2,3	4,5%
P2	51,49	49,74	1,8	3,4%	51,41	49,18	2,2	4,3%
P3	51,85	49,69	2,2	4,2%	51,75	49,23	2,5	4,9%
P4	51,08	49,26	1,8	3,6%	51,02	49,26	1,8	3,4%
P5	51,15	49,20	2,0	3,8%	51,13	49,41	1,7	3,4%
P6	51,45	49,44	2,0	3,9%	51,87	49,96	1,9	3,7%
P7	50,72	49,00	1,7	3,4%	50,83	49,37	1,5	2,9%
P8	51,22	49,22	2,0	3,9%	51,12	49,43	1,7	3,3%
P9	51,46	49,19	2,3	4,4%	51,48	49,47	2,0	3,9%
Média	51,29	49,35	1,9	3,8%	51,32	49,37	2,0	3,8%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	559,6	534,3	25,3	4,5%	566,1	544,4	21,7	3,8%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	4,2%				

P-CS-100								
PONTOS	PROVETE 1				PROVETE 2			
	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	49,01	46,90	2,1	4,3%	49,14	47,48	1,7	3,4%
P2	48,43	46,42	2,0	4,2%	49,33	47,52	1,8	3,7%
P3	47,64	45,74	1,9	4,0%	49,29	47,26	2,0	4,1%
P4	48,66	46,97	1,7	3,5%	48,93	47,19	1,7	3,6%
P5	48,22	46,43	1,8	3,7%	48,94	47,00	1,9	4,0%
P6	47,94	46,13	1,8	3,8%	49,08	47,21	1,9	3,8%
P7	48,69	46,88	1,8	3,7%	48,79	47,04	1,8	3,6%
P8	48,12	46,30	1,8	3,8%	48,97	47,00	2,0	4,0%
P9	47,41	45,83	1,6	3,3%	48,95	46,73	2,2	4,5%
Média	48,24	46,40	1,8	3,8%	49,05	47,16	1,9	3,8%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	478,7	460,8	17,9	3,7%	498,1	479,1	19,0	3,8%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	3,8%				

S-CP-0								
PONTOS	PROVETE 1				PROVETE 2			
	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	47,26	46,04	1,2	2,6%	48,96	46,53	2,4	5,0%
P2	47,68	46,24	1,4	3,0%	48,37	46,65	1,7	3,6%
P3	47,50	46,22	1,3	2,7%	48,52	46,61	1,9	3,9%
P4	48,09	46,34	1,8	3,6%	47,87	46,03	1,8	3,8%
P5	48,42	46,65	1,8	3,7%	47,57	45,95	1,6	3,4%
P6	48,36	46,56	1,8	3,7%	47,75	46,11	1,6	3,4%
P7	48,64	46,80	1,8	3,8%	47,22	45,56	1,7	3,5%
P8	48,55	47,10	1,5	3,0%	47,63	45,84	1,8	3,8%
P9	48,98	47,02	2,0	4,0%	47,46	45,74	1,7	3,6%
Média	48,16	46,55	1,6	3,3%	47,93	46,11	1,8	3,8%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	537,4	514	23,4	4,4%	532,8	510,5	22,3	4,2%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	4,3%				

S-CP-50								
PONTOS	PROVETE 1				PROVETE 2			
	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	50,83	49,22	1,6	3,2%	51,32	49,20	2,1	4,1%
P2	51,17	49,44	1,7	3,4%	51,02	49,39	1,6	3,2%
P3	51,54	49,44	2,1	4,1%	50,66	49,38	1,3	2,5%
P4	50,84	49,00	1,8	3,6%	51,37	48,84	2,5	4,9%
P5	50,84	48,63	2,2	4,3%	51,35	48,82	2,5	4,9%
P6	51,26	48,95	2,3	4,5%	50,94	49,14	1,8	3,5%
P7	50,65	48,47	2,2	4,3%	51,49	48,64	2,9	5,5%
P8	50,86	48,63	2,2	4,4%	51,37	48,83	2,5	4,9%
P9	51,11	48,64	2,5	4,8%	50,96	48,79	2,2	4,3%
Média	51,01	48,94	2,1	4,1%	51,16	49,00	2,2	4,2%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	545,5	522,5	23,0	4,2%	547,5	524,3	23,2	4,2%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	4,2%				

S-CP-100								
PONTOS	PROVETE 1				PROVETE 2			
	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	51,43	49,65	1,8	3,5%	51,42	50,51	0,9	1,8%
P2	51,80	50,06	1,7	3,4%	51,61	50,21	1,4	2,7%
P3	51,99	50,16	1,8	3,5%	51,95	49,54	2,4	4,6%
P4	51,76	49,29	2,5	4,8%	51,28	50,56	0,7	1,4%
P5	52,21	49,39	2,8	5,4%	51,31	50,01	1,3	2,5%
P6	52,09	49,68	2,4	4,6%	51,86	49,94	1,9	3,7%
P7	52,02	48,96	3,1	5,9%	50,93	50,60	0,3	0,6%
P8	52,22	49,36	2,9	5,5%	51,37	49,97	1,4	2,7%
P9	52,59	49,47	3,1	5,9%	51,59	49,52	2,1	4,0%
Média	52,01	49,56	2,5	4,7%	51,48	50,10	1,4	2,7%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	552,3	532	20,3	3,7%	548,4	526,9	21,5	3,9%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	3,8%				

S-CS-0								
PONTOS	PROVETE 1				PROVETE 2			
	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	48,47	46,17	2,3	4,7%	50,62	47,98	2,6	5,2%
P2	48,73	46,66	2,1	4,2%	50,45	48,52	1,9	3,8%
P3	48,99	47,25	1,7	3,6%	50,60	49,11	1,5	2,9%
P4	48,86	46,70	2,2	4,4%	50,29	48,05	2,2	4,5%
P5	48,70	46,90	1,8	3,7%	49,90	48,15	1,8	3,5%
P6	49,81	47,37	2,4	4,9%	49,92	48,93	1,0	2,0%
P7	49,60	46,57	3,0	6,1%	50,27	47,70	2,6	5,1%
P8	49,82	46,86	3,0	5,9%	49,79	48,22	1,6	3,2%
P9	49,63	47,60	2,0	4,1%	49,79	48,78	1,0	2,0%
Média	49,18	46,90	2,3	4,6%	50,18	48,38	1,8	3,6%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	530,8	510,4	20,4	3,8%	558,8	532,4	26,4	4,7%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	4,3%				

S-CS-50								
PONTOS	PROVETE 1				PROVETE 2			
	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	51,65	50,19	1,5	2,8%	51,62	50,34	1,3	2,5%
P2	51,34	50,44	0,9	1,8%	51,96	50,31	1,7	3,2%
P3	51,37	50,26	1,1	2,2%	52,38	50,04	2,3	4,5%
P4	51,98	50,52	1,5	2,8%	51,53	49,99	1,5	3,0%
P5	51,67	50,28	1,4	2,7%	51,62	49,80	1,8	3,5%
P6	51,77	50,12	1,7	3,2%	52,30	49,81	2,5	4,8%
P7	52,20	50,05	2,2	4,1%	51,26	49,78	1,5	2,9%
P8	51,68	50,32	1,4	2,6%	51,64	49,79	1,9	3,6%
P9	51,44	50,28	1,2	2,3%	52,20	49,43	2,8	5,3%
Média	51,68	50,27	1,4	2,7%	51,83	49,92	1,9	3,7%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	563,1	540,8	22,3	4,0%	572,7	545,6	27,1	4,7%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	4,3%				

S-CS-100								
PONTOS	PROVETE 1				PROVETE 2			
	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL	L ₀ (mm)	L _f (mm)	ΔL (mm)	ΔL
P1	51,31	49,92	1,4	2,7%	52,22	49,86	2,4	4,5%
P2	51,49	49,30	2,2	4,3%	52,16	50,06	2,1	4,0%
P3	51,57	48,93	2,6	5,1%	52,06	49,93	2,1	4,1%
P4	51,52	49,99	1,5	3,0%	51,74	49,74	2,0	3,9%
P5	51,90	49,76	2,1	4,1%	51,31	49,41	1,9	3,7%
P6	51,80	49,20	2,6	5,0%	51,95	49,62	2,3	4,5%
P7	51,56	50,27	1,3	2,5%	51,38	49,33	2,1	4,0%
P8	51,91	49,63	2,3	4,4%	51,14	49,37	1,8	3,5%
P9	52,17	49,29	2,9	5,5%	51,08	49,24	1,8	3,6%
Média	51,69	49,59	2,1	4,1%	51,67	49,62	2,1	4,0%
	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM	M ₀ (g)	M _f (g)	ΔM (g)	ΔM
	530	508,3	21,7	4,1%	535,5	514,0	21,5	4,0%
	Média (ΔL)		Média (ΔM)	4,1%				

Anexo E5 - Resultados do ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons

Quadro E7 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação dos ultrassons aos 7 dias

BR	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7994,2	7838,8	8087,7	7974	D.P.	Variância	
	Massa volúmica (kg/m ³)	2368,7	2322,6	2396,4	2362,5	30,4	1,3%	
	Velocidade (m/s)	4953,5	4937,7	4910,0	4933,7	18,0	0,4%	
S-CP-0	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7850,8	8076,9		7964	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2326,2	2393,2		2359,7	-0,1%	33,5	1,4%
	Velocidade (m/s)	4777,5	4712,7		4745,1	-3,8%	32,4	0,7%
S-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	8007,4	7905,8	8036,3	7983	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2372,6	2342,5	2381,1	2365,4	0,1%	16,6	0,7%
	Velocidade (m/s)	4854,0	4902,0	4639,7	4878,0	-1,1%	24,0	0,5%
P-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7915,2	7943,3	7939,2	7933	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2345,2	2353,6	2352,4	2350,4	-0,5%	3,7	0,2%
	Velocidade (m/s)	4905,7	4851,8	4888,8	4882,1	-1,0%	22,5	0,5%
P-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7553,9	7520,8	7488,3	7521	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2238,2	2228,4	2218,8	2228,4	-5,7%	7,9	0,4%
	Velocidade (m/s)	4466,3	4440,3	4405,7	4437,4	-10,1%	24,9	0,6%
P-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)			7504,4	7504	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)			2223,5	2223,5	-5,9%	0,0	0,0%
	Velocidade (m/s)	4393,8	4344,3	4361,0	4366,4	-11,5%	20,6	0,5%
S-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7539,6	7490,2	7490,5	7507	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2234,0	2219,3	2219,4	2224,2	-5,9%	6,9	0,3%
	Velocidade (m/s)	4414,3	4509,0	4442,5	4455,3	-9,7%	39,7	0,9%
S-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7581,2	7627,9	7648,6	7619	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2246,3	2260,1	2266,3	2257,6	-4,4%	8,4	0,4%
	Velocidade (m/s)	4237,7	4197,7	4259,7	4231,7	-14,2%	25,7	0,6%

P-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7796,7	7787,0	7816,1	7800	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2310,1	2307,3	2315,9	2311,1	-2,2%	3,6	0,2%
	Velocidade (m/s)	4734,7	4542,7	4633,7	4637,0	-6,0%	78,4	1,7%
P-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7790,7	7834,6	7849,5	7825	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2308,4	2321,4	2325,8	2318,5	-1,9%	7,4	0,3%
	Velocidade (m/s)	4728,2	4910,2	4836,5	4824,9	-2,2%	74,7	1,5%
S-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7921,4	7827,5	7763,2	7837	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2347,1	2319,3	2300,2	2322,2	-1,7%	19,3	0,8%
	Velocidade (m/s)	4831,2	4795,3	4827,2	4817,9	-2,3%	16,0	0,3%
S-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7910,1	7834,7	7826,9	7857	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2343,7	2321,4	2319,1	2328,1	-1,5%	11,1	0,5%
	Velocidade (m/s)	4815,5	4765,7	4695,2	4758,8	-3,5%	49,4	1,0%

Quadro E8 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação dos ultrassons aos 28 dias

BR	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7801,4	7859,7	7925,8	7862	D.P.	Variância	
	Massa volúmica (kg/m ³)	2311,5	2328,8	2348,4	2329,6	15,1	0,6%	
	Velocidade (m/s)	4937,3	4934,3	4915,7	4935,8	9,6	0,2%	
S-CP-0	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7806,0	7819,6	7763,8	7796	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2312,9	2316,9	2300,4	2310,1	-0,8%	7,0	0,3%
	Velocidade (m/s)	4956,5	4908,0	4855,3	4906,6	-0,6%	41,3	0,8%
S-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7785,1	7837,3	7812,7	7812	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2306,7	2322,2	2314,9	2314,6	-0,6%	6,3	0,3%
	Velocidade (m/s)	4865,0	4875,3	4894,0	4878,1	-1,2%	12,0	0,2%
P-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7999,5	7956,3	7943,5	7966	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2370,2	2357,4	2353,6	2360,4	1,3%	7,1	0,3%
	Velocidade (m/s)	4841,3	4950,7	4899,3	4897,1	-0,8%	44,7	0,9%
P-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7590,0	7706,5	7423,5	7573	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2248,9	2283,4	2199,6	2244,0	-3,7%	34,4	1,5%
	Velocidade (m/s)	4350,3	4377,5	4506,8	4442,2	-10,0%	68,3	1,5%
P-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7597,3	7496,5	7463,6	7519	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2251,1	2221,2	2211,4	2227,9	-4,4%	16,9	0,8%
	Velocidade (m/s)	4474,7	4577,2	4537,2	4529,7	-8,2%	42,2	0,9%
S-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7557,5	7464,5	7567,4	7530	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2239,3	2211,7	2242,2	2231,1	-4,2%	13,7	0,6%
	Velocidade (m/s)	4634,5	4596,5	4591,8	4607,6	-6,6%	19,1	0,4%
S-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7540,3	7521,7	7505,6	7523	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2234,2	2228,7	2223,9	2228,9	-4,3%	4,2	0,2%
	Velocidade (m/s)	4452,0	4407,8	4409,8	4423,2	-10,4%	20,4	0,5%

P-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7793,5	7718,9	7847,5	7787	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2309,2	2287,1	2325,2	2307,2	-1,0%	15,6	0,7%
	Velocidade (m/s)	4740,3	4836,7	4844,2	4807,1	-2,6%	47,3	1,0%
P-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7751,4	7810,2	7738,8	7767	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2296,7	2314,1	2293,0	2301,3	-1,2%	9,2	0,4%
	Velocidade (m/s)	4907,5	4915,5	4846,5	4889,8	-0,9%	30,8	0,6%
S-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7810,0	7829,5		7820	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2314,1	2319,9		2317,0	-0,5%	2,9	0,1%
	Velocidade (m/s)	4805,8	4860,0	4886,5	4850,8	-1,7%	33,6	0,7%
S-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7784,3	7801,2	7756,7	7781	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2306,5	2311,5	2298,3	2305,4	-1,0%	5,4	0,2%
	Velocidade (m/s)	4820,7	4839,5	4849,3	4836,5	-2,0%	11,9	0,2%

Quadro E9 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação dos ultrassons aos 91 dias

BR	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7861,6	7863,9	7783,1	7836	D.P.	Variância	
	Massa volúmica (kg/m ³)	2329,4	2330,0	2306,1	2321,8	11,1	0,5%	
	Velocidade (m/s)	5019,8	4989,3	5009,2	5014,5	5,3	0,1%	
S-CP-0	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7968,7	7950,5	7814,6	7911	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2361,1	2355,7	2315,4	2344,1	1,0%	20,4	0,9%
	Velocidade (m/s)	5039,7	5056,7	5022,7	5039,7	0,5%	13,9	0,3%
S-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7906,7	7925,9	7967,1	7933	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2342,7	2348,4	2360,6	2350,6	1,2%	7,5	0,3%
	Velocidade (m/s)	4986,5	5051,0	5020,2	5003,3	-0,2%	16,8	0,3%
P-CS-0	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7990,9	7815,7	7733,2	7847	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2367,7	2315,8	2291,3	2324,9	0,1%	31,8	1,4%
	Velocidade (m/s)	4989,3	5025,8	4948,3	4987,8	-0,5%	31,7	0,6%
P-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7466,5	7395,2	7451,1	7438	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2212,3	2191,2	2207,7	2203,7	-5,1%	9,1	0,4%
	Velocidade (m/s)	4407,7	4382,2	4360,5	4383,4	-12,6%	19,3	0,4%
P-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7382,3	7407,2		7395	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2187,3	2194,7		2191,0	-5,6%	3,7	0,2%
	Velocidade (m/s)	4491,0	4354,3		4422,7	-11,8%	68,3	1,5%
S-CP-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7417,2	7520,7		7469	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2197,7	2228,4		2213,0	-4,7%	15,3	0,7%
	Velocidade (m/s)	4281,7	4333,2		4307,4	-14,1%	25,8	0,6%
S-CS-100	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7470,6	7446,4		7459	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2213,5	2206,3		2209,9	-4,8%	3,6	0,2%
	Velocidade (m/s)	4325,7	4308,5		4317,1	-13,9%	8,6	0,2%

P-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7809,0	7704,8	7834,8	7783	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2313,8	2282,9	2321,4	2306,0	-0,7%	16,7	0,7%
	Velocidade (m/s)	4805,3	4926,3	4904,8	4878,8	-2,7%	52,7	1,1%
P-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7715,3	7763,0	7697,7	7725,3	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2286,0	2300,1	2280,8	2289,0	-1,4%	8,2	0,4%
	Velocidade (m/s)	4880,7	4891,5	4872,7	4881,6	-2,7%	7,7	0,2%
S-CS-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7692,9	7693,4	7785,3	7723,9	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2279,4	2279,5	2306,8	2288,6	-1,4%	12,9	0,6%
	Velocidade (m/s)	4880,7	4863,2	4815,8	4839,5	-3,5%	23,7	0,5%
S-CP-50	Provete	1	2	3	Média			
	Massa (g)	7627,5	7591,2	7808,2	7676	Var. AC	D.P.	Variância
	Massa volúmica (kg/m ³)	2260,0	2249,2	2313,5	2274,3	-2,0%	28,1	1,2%
	Velocidade (m/s)	4752,2	4790,2	4833,8	4792,1	-4,4%	33,4	0,7%