



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**

# **Comportamento de betões produzidos com água da lavagem de agregados finos reciclados de resíduos de construção e demolição**

**MATHEUS MOURA OLIVEIRA**

Bacharel em Arquitetura

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientadores:

Doutor Luís Manuel da Rocha Evangelista

Doutora Maria Idália da Silva Gomes

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Manuel Vaz Pinto Almeida Vasques

Vogais:

Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Doutor Luís Manuel da Rocha Evangelista

**Dezembro de 2019**



## **AGRADECIMENTOS**

Nossas conquistas são fruto não só de nosso esforço, mas também da colaboração de outras pessoas. O apoio de colegas e amigos foi fundamental no desenvolvimento deste trabalho, e não poderia encerrá-lo sem agradecê-los.

À minha esposa Clarissa, amiga e companheira em todos os momentos. Obrigado principalmente por acreditar no meu potencial.

Aos meus pais Wilson e Arlinda, e aos meus irmãos, Victor e Carol, a quem furtei os últimos anos de convivência, mas mesmo assim estiveram sempre a me incentivar.

Aos orientadores, Doutor Luís Evangelista e Doutora Maria Idália Gomes, pela paciência, disponibilidade, ensinamentos e grandes contribuições nos experimentos e no trabalho realizado. Saliento a exigência dos professores, e grande conhecimento técnico acerca dos assuntos abordados no trabalho.

Aos amigos Tiago e Victor, parte da família em Portugal, pela ajuda prestada nos experimentos, e pela grande amizade e presença em minha vida nos últimos anos.

Ao senhor António Magalhães, técnico do Laboratório de Engenharia Civil do ISEL, expresse meu agradecimento pelo apoio técnico prestado na campanha experimental.

Aos amigos e professores do ISEL, por partilharem essa jornada e pela troca de conhecimentos.

À empresa SGR, pela disponibilização dos resíduos necessários ao desenvolvimento da campanha experimental desta tese.

A Deus, por estar presente em todos os momentos.

A todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.



## RESUMO

A utilização de agregados grossos reciclados na produção de betões é consensual nos dias de hoje, mesmo que em pequenas percentagens de substituição. No entanto, os agregados finos reciclados (AFR) estão em geral excluídos, sendo a sua utilização proibida em betões, indiferentemente da sua função ou destino. A razão para esta interdição está relacionada com diversos fatores, sendo um dos principais a presença de elevadas taxas de contaminantes, nomeadamente matéria orgânica e materiais leves. Apesar disso, estes agregados apresentam taxas muito elevadas de materiais inertes se estes contaminantes forem removidos, por exemplo através de lavagem. Este processo acarreta um impacto ambiental elevado, devido à utilização intensiva de água, que o torna insustentável, tanto em termos económicos, como ambientais.

Este trabalho compreende a execução de uma campanha experimental para analisar e caracterizar o comportamento de betões produzidos com água da lavagem de AFR provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD). Como referido, ao utilizar a água proveniente do processo de lavagem dos AFR como água de amassadura, reduz o impacto ambiental no processo de tratamento e reduz o consumo de água potável.

Primeiramente foram analisadas as características dos AFR utilizados para produzir famílias de betão com diferentes percentagens de substituição dos agregados finos naturais (AFN) por AFR, em termos de distribuição granulométrica, baridade, volume de vazios, absorção de água e massa volúmica. Os betões produzidos foram ensaiados em termos de comportamento mecânico, nomeadamente compressão axial e tração por compressão diametral, em idades de referência de 7, 28 e 91 dias.

A partir dos resultados do estudo concluiu-se que os AFR possuem propriedades físicas piores para a produção de betão que os agregados finos naturais, e que a utilização de AFR e de água de lavagem prejudica as propriedades mecânicas do betão que foram estudadas. Porém, o uso de materiais reciclados no processo tem grande potencial de diminuir o impacto ambiental proveniente da lavagem de agregados, e da extração de areia nova. Em termos mecânicos, a utilização de betões produzidos com AFR e água de lavagem é viável se limitações forem consideradas na composição dos betões.

**Palavras chave:** Resíduos construção e demolição; agregados finos reciclados; água de lavagem; sustentabilidade ambiental; reciclagem.



## ABSTRACT

The use of recycled coarse aggregate in concrete production is consensual today, even if in small replacement percentages. However, recycled fine aggregates are generally excluded and their use is restricted in concrete, regardless of its function or destination. The reason for this restriction is related to several factors, one of which being the presence of high rates of contaminant, especially organic and lightweight materials. Nevertheless, these aggregates have very high percentages of inert materials if their main contaminates were to be removed, for example by washing. This process includes a high environmental impact due to intensive water use, which becomes economically and environmentally unsustainable.

This work comprises an experimental campaign to analyze and characterize the behavior of recycled fine aggregates from construction and demolition waste with and without washing and later using the washing water as mixing water in the recycled fine aggregates concrete. As mentioned, using water from the recycled fine aggregates washing process as mixing water reduces the environmental impact on the treatment process and reduces drinkable water consumption.

First, the characteristics of the recycled fine aggregates used to produce concrete families with different percentages of replacement of natural fine aggregates by recycled fine aggregates were analyzed in terms of particle size distribution, bulk density, void volume, water absorption and density. Later, the concretes produced were tested in terms of mechanical behavior, specifically compressive strength and splitting tensile strength, at reference ages of 7, 28 and 91 days.

From the results of the study, it was possible to conclude that recycled fine aggregates have worse physical properties for concrete production than natural fine aggregates, and that the use of this material and washing water impairs the mechanical properties of concrete that have been studied. However, the use of these aggregates in concrete mixtures has great potential to reduce the environmental impact caused by aggregate washing and sand extraction. Overall, the use of concrete produced with recycled fine aggregates and washing water is feasible if limitations are considered in the concrete composition.

**Keywords:** construction and demolition waste; recycled fine aggregates; washing water; environmental sustainability; recycling.



## ABREVIATURAS

AFN	Agregado fino natural
AFR	Agregado fino reciclado
AFN	Agregado fino natural
AM	Agregado miúdo (fino)
AN	Agregado natural
APEB	Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto
AR	Agregado reciclado
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BIOIS	<i>Bio Intelligence Service</i>
BR	Betão de referência
CE	Comissão Europeia
EU	<i>European Union</i>
IMPIC	Instituto dos Mercado Públicos, do Mobiliário e da Construção
IPQ	Instituto Português de Qualidade
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
ISO	<i>International Organization of Standardization</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
PT	Portugal
RCD	Resíduo de construção e demolição
SGR	Sociedade Gestora de Resíduos



## SIMBOLOGIA

$a/c$	Relação água/cimento
$A_c$	Área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm <sup>2</sup> )
$d$	Dimensão da secção transversal (mm).
$F$	Força (kN)
$f_c$	Resistência à compressão do provete (MPa)
$f_{cm}$	Resistência à compressão média (MPa)
$f_{ct}$	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
$f_{ctm}$	Resistência à tração média (MPa);
$h$	Altura
$L$	Comprimento da linha de contato do provete (mm)
$M$	Massa
$MPa$	Mega pascal
$SE$	Equivalente de areia
$v$	Percentagem média de vazios (%)
$W$	Absorção de água
$W_{A24}$	Absorção de água após imersão em água durante 24 h (%)
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$\rho$	Massa volúmica (kg/dm <sup>3</sup> )
$\rho_a$	Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm <sup>3</sup> )
$\rho_b$	Baridade
$\rho_{rd}$	Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm <sup>3</sup> )
$\rho_{ssd}$	Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm <sup>3</sup> )
$\Delta$	Variação



## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Metodologia.....	4
1.4. Estrutura do trabalho.....	6
2. ESTADO DA ARTE.....	7
2.1. Propriedades físicas dos agregados reciclados finos.....	10
2.1.1. Distribuição granulométrica .....	11
2.1.2. Baridade e volume de vazios.....	30
2.1.3. Massa volúmica.....	39
2.1.4. Textura superficial e forma dos grãos.....	44
2.2. Propriedades dos betões com agregados finos reciclados no estado endurecido .....	45
2.2.1. Resistência à compressão.....	45
2.2.2. Resistência à tração .....	50
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	53
3.1. Introdução .....	53
3.2. Materiais utilizados.....	55
3.3. Lavagem dos AFR.....	55
3.4. Determinação da composição do betão.....	60
3.5. Ensaio realizados nos agregados finos reciclados .....	64
3.5.1. Análise granulométrica .....	64
3.5.2. Massa volúmica e absorção de água .....	65
3.5.3. Determinação do teor de finos.....	71
3.5.4. Baridade e volume de vazios.....	74
3.6. Ensaio em betões no estado endurecido .....	76

3.6.1. Resistência à compressão.....	76
3.6.2. Resistência à tração por compressão diametral .....	77
4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS .....	81
4.1. Propriedade dos agregados finos reciclados.....	81
4.1.1. Curva granulométrica .....	81
4.1.2. Teor de finos.....	85
4.1.3. Baridade e volume de vazios.....	86
4.1.4. Massa volúmica e absorção de água .....	88
4.2. Propriedade dos betões no estado endurecido .....	93
4.2.1. Produção dos betões.....	93
4.2.2. Betão de referência .....	94
4.2.3. Família 1 .....	96
4.2.4. Família 2.....	101
4.2.5. Família 3.....	107
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	117
5.1. Considerações finais .....	117
5.2. Desenvolvimentos futuros .....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	121
ANEXOS .....	i
ANEXO A – Relatórios de ensaios nos agregados naturais .....	v
ANEXO B – Esforços de rotura dos ensaios realizados nos betões .....	ix
ANEXO C – Reta de regressão dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial .....	xi
ANEXO D – Reta de regressão dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.....	xvii

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva granulométrica de agregados finos e grossos .....	12
Figura 2.2 - Curva granulométrica agregados finos reciclados e naturais .....	13
Figura 2.3 - Curva granulométrica amostra Ambilei – agregados com origem em betões.. .....	14
Figura 2.4 - Curva granulométrica amostra Ambilei – agregados com origem em RCD.. .....	15
Figura 2.5 - Curva granulométrica amostra Ambilei – agregados com origem em RCD.. .....	17
Figura 2.6 – Comparação entre curvas granulométrica das amostras Ambilei. ....	18
Figura 2.7 - Curva granulométrica amostra Arvela – agregados com origem em RCD.. .....	19
Figura 2.8 - Curva granulométrica amostra Retria – agregados com origem em RCD.. .....	20
Figura 2.9 - Curva granulométrica amostra Trianovo – agregados com origem em RCD.. .....	21
Figura 2.10 - Curva granulométrica amostra SGR#1 – agregados com origem em RCD.. .....	22
Figura 2.11 - Curva granulométrica amostra SGR#2 – agregados com origem em RCD.. .....	23
Figura 2.12 - Curva granulométrica amostra Valnor – agregados com origem em RCD.. .....	24
Figura 2.13 - Curva granulométrica primeira amostra Vimajas – agregados com origem em RCD#1.....	26
Figura 2.14 - Curva granulométrica segunda amostra Vimajas – agregados com origem em RCD.....	27

Figura 2.15 – Comparação entre curvas granulométrica das amostras Vimajas. ....	29
Figura 2.16 – Absorção de água em função do AFR da central de reciclagem. ....	37
Figura 2.17 - Relação entre a massa volúmica e a absorção de água dos AR.....	41
Figura 2.18 - Massa volúmica de diferentes centrais.. ....	44
Figura 2.19 - Resultados de resistência à compressão .....	46
Figura 2.20- Resistência à compressão dos betões para três amostras, com diferentes taxas de substituição para agregado fino reciclado aos 7 dias.....	48
Figura 2.21- Resistência à compressão dos betões para três amostras, com diferentes taxas de substituição para agregado fino reciclado aos 28 dias.....	49
Figura 2.22- Resistência à compressão dos betões para três amostras, com diferentes taxas de substituição para agregado fino reciclado aos 91 dias.....	49
Figura 3.1- Provetes - betão de referência.....	54
Figura 3.2- RCD fornecido pela SGR.....	57
Figura 3.3- Resíduo rejeitado após peneiração através do peneiro de 2 mm.....	57
Figura 3.4- Processo de lavagem inicial dos AFR.....	58
Figura 3.5- Aspeto dos AFR ao final da lavagem. ....	58
Figura 3.6- Diferença entre amostras do AFR lavados (esquerda) e não lavados (direita). ....	58
Figura 3.7- À esquerda, a água da rede pública; ao centro, água de lavagem após 1 dia de decantação; e à direita, água de lavagem imediatamente após a lavagem. ....	59
Figura 3.8- Hexametáfosfato de sódio. ....	66
Figura 3.9- Efeito de coesão da argila no AFR.....	66
Figura 3.10- Pesagem do AR lavado no teste do picnómetro. ....	68
Figura 3.11- Pesagem do AR não lavado no teste do picnómetro.....	68
Figura 3.12- Secagem da superfície do AR.....	69

Figura 3.13- Molde troncocónico e pilão. ....	69
Figura 3.14- Agregado saturado com superfície seca após remoção do molde troncocónico. ....	69
Figura 3.15- AFR não lavado na proveta. ....	72
Figura 3.16- AFR lavado na proveta. ....	72
Figura 3.17 - Ensaio de resistência à compressão axial.....	77
Figura 3.18- Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	78
Figura 4.1- Curva granulométrica do RCD. ....	81
Figura 4.2- Comparação das curvas granulométrica do RCD e dos AFN.....	83
Figura 4.3- Comparação das curvas granulométrica de amostras da central SGR. ....	84
Figura 4.4 - Comparação entre a massa volúmica e a absorção de água dos AR. ....	91
Figura 4.5 - Amassadura na betoneira. ....	94
Figura 4.6 - Enchimento dos moldes.....	94
Figura 4.7 - Comparativo fcm da Família 1 em diferentes idades.....	98
Figura 4.8 - Provete rompido no ensaio de compressão diametral.....	100
Figura 4.9 - Comparativo fctm da Família 1 em diferentes idades.....	100
Figura 4.10 - Comparativo fcm da Família 2 em diferentes idades.....	103
Figura 4.11 - Comparativo fcm das Família 1 e 2.....	104
Figura 4.12 - Comparativo fctm da Família 2 em diferentes idades.....	106
Figura 4.13 - Comparativo fctm das Família 1 e 2.....	107
Figura 4.14 - Comparativo fcm da Família 3 em diferentes idades.....	110
Figura 4.15 - Comparativo fcm das Família 3 e 2.....	111
Figura 4.16 - Comparativo fcm BR e A08.....	111

Figura 4.17 – Comparativo fctm da Família 3.....	114
Figura 4.18 - Comparativo fctm das Família 3 e 2.....	115
Figura 4.19 - Comparativo fctm BR e A08.....	115

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Famílias de betões e constituições .....	5
Tabela 2.1: Produção e reciclagem de RCD na EU.....	8
Tabela 2.2: Origem dos resíduos. ....	8
Tabela 2.3: Principais origens e tipos de resíduos da União Europeia.....	9
Tabela 2.4: Composição dos RCD por tipo de atividade, em percentagem por peso ...	10
Tabela 2.5: Constituição de RCD da amostra que origina o AFR .....	11
Tabela 2.6: Distribuição granulométrica da amostra Ambilei – agregados com origem em betões . ....	14
Tabela 2.7: Distribuição granulométrica da amostra Ambilei – agregados com origem em RCD .....	15
Tabela 2.8: Distribuição granulométrica da amostra Ambilei.....	16
Tabela 2.9: Composição do RCS amostra Ambilei.....	17
Tabela 2.10: Distribuição granulométrica da amostra Arvela – agregados com origem em RCD .....	19
Tabela 2.11: Distribuição granulométrica da amostra Retria – agregados com origem em RCD .....	20
Tabela 2.12: Distribuição granulométrica da amostra Trianovo – agregados com origem em RCD .....	21
Tabela 2.13: Distribuição granulométrica da amostra Sociedade Gestora de Resíduos – agregados com origem em RCD #1 .....	22
Tabela 2.14: Distribuição granulométrica da amostra Sociedade Gestora de Resíduos – agregados com origem em RCD #2.....	23
Tabela 2.15: Distribuição granulométrica da amostra Valnor – agregados com origem em RCD .....	24

Tabela 2.16: Distribuição granulométrica da amostra Vimajas – agregados com origem em RCD #1 .....	25
Tabela 2.17: Distribuição granulométrica da amostra Vimajas – agregados com origem em RCD #2 .....	26
Tabela 2.18: Distribuição granulométrica da amostra Vimajas .....	28
Tabela 2.19: Composição do RCD amostra Vimajas.....	28
Tabela 2.20: Baridade dos agregados .....	30
Tabela 2.21: Baridade dos agregados .....	31
Tabela 2.22: Baridade dos agregados .....	31
Tabela 2.23: Baridade dos agregados finos reciclados .....	32
Tabela 2.24: Comparação de propriedades de diferentes tipos de agregados.....	34
Tabela 2.25: Taxas de absorção de agregados reciclados em função do tipo de origem e granulometria.....	36
Tabela 2.26: Taxas de absorção de agregados reciclados em função da granulometria .....	36
Tabela 2.27: Taxas de absorção de agregados reciclados em função da central de reciclagem.....	37
Tabela 2.28: Taxas de absorção de agregados naturais .....	38
Tabela 2.29: Taxas de absorção de agregados reciclados.....	38
Tabela 2.30: Massas volúmicas de AN.....	41
Tabela 2.31: Massas volúmicas de AFR. ....	42
Tabela 2.32: Massas volúmicas de AFR. ....	42
Tabela 2.33: Massas volúmicas de AFR.....	43
Tabela 2.34: Massas volúmicas e absorção de água.....	43

Tabela 2.35: Resultados do ensaio de resistência à compressão .....	47
Tabela 2.36: Composição dos betões com diferentes dosagens de AFR. ....	48
Tabela 2.37: Variação da resistência à tração com diferentes taxas de substituição de AFR .....	51
Tabela 3.1: Quantidade de provetes necessários à pesquisa. ....	54
Tabela 3.9: Valores de referência para fabrico de betões .....	60
Tabela 3.10: Volume de betão por amassadura. ....	61
Tabela 3.11: Volume dos compostos da mistura por amassadura. ....	62
Tabela 3.12: Pesos específicos dos materiais. ....	63
Tabela 3.13: Quantidades dos compostos das amassaduras. ....	63
Tabela 3.2: Dimensões de abertura dos peneiros, de acordo com a NP EN 933-2. ....	64
Tabela 3.3: Distribuição granulométrica da amostra. ....	65
Tabela 3.4: Resultados do ensaio do picnómetro nos AR lavados. ....	71
Tabela 3.5: Resultados do ensaio do picnómetro nos AR não lavados. ....	71
Tabela 3.6: Resultados do ensaio do equivalente de areia. ....	74
Tabela 3.7: Resultados do ensaio da baridade e volume de vazios nos AR não lavados. .....	75
Tabela 3.8: Resultados do ensaio da baridade e volume de vazios nos AR lavados. ...	76
Tabela 4.2: Granulometria AN 0/2 mm. ....	82
Tabela 4.3: Granulometria AN 0/4 mm. ....	83
Tabela 4.4: Baridade e volume de vazios dos AFR não lavados. ....	86
Tabela 4.5: Baridade e volume de vazios dos AFR lavados. ....	86
Tabela 4.6: Baridade e volume de vazios dos agregados naturais finos. ....	87

Tabela 4.7: Massa volúmica e absorção de água dos AFR não lavados. ....	88
Tabela 4.8: Massa volúmica e absorção de água dos AFR lavados. ....	88
Tabela 4.9: Massas volúmicas e absorção de água das amostras da SGR .....	90
Tabela 4.10: Massas volúmicas de AN.....	92
Tabela 4.11: Composição do BR.....	94
Tabela 4.12: Resistência à compressão do BR. ....	95
Tabela 4.13: Resistência à tração por compressão diametral do BR. ....	95
Tabela 4.14: Composição dos betões da Família 1.....	96
Tabela 4.15: Resistência à compressão dos betões da Família 1. ....	97
Tabela 4.16: Resistência à tração por compressão diametral dos betões da Família 1. .....	99
Tabela 4.17: Composição dos betões da Família 2.....	101
Tabela 4.18: Resistência à compressão dos betões da Família 2. ....	102
Tabela 4.19: Resistência à tração por compressão diametral dos betões da Família 2. .....	105
Tabela 4.20: Composição dos betões da Família 3.....	108
Tabela 4.21: Resistência à compressão dos betões da Família 3. ....	109
Tabela 4.22: Resistência à tração por compressão diametral dos betões da Família 3. .....	113

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Atualmente, uma das maiores preocupações em diversas áreas da atividade humana é a sustentabilidade, o objetivo é suprir as nossas necessidades sem comprometer o futuro do nosso planeta. A sustentabilidade está relacionada com o desenvolvimento tecnológico, a partir do uso de recursos de forma mais inteligente, para que estes se mantenham no futuro. Há uma necessidade urgente que a prática sustentável em diversos setores que contribuem para o impacto ambiental seja dominante. É necessário mudar os nossos modelos de consumo e produção, para que possamos enfrentar os desafios presentes, devemos reduzir custos, gastos energéticos, reutilizar e reciclar. Os setores de atividade económica que possuem maior necessidade de adaptação, são também aqueles onde o consumo têm maior impacto.

Uma das atividades mais importantes da economia da Europa, e que têm movimentado bastante o mercado em Portugal nos últimos anos é a construção civil. Segundo o Relatório Semestral do Sector da Construção em Portugal, referente ao 1º semestre de 2017, elaborado pelo Instituto dos Mercado Públicos, do Mobiliário e da Construção (IMPIC), é contínua a recuperação do setor da construção em Portugal, assim como o aumento do emprego na área. A evolução é comprovada pela observação de alguns indicadores, como a variação positiva do investimento no setor, e a subida de licenciamentos de edifícios no território nacional. A atividade da construção ainda movimenta outros muitos setores, devido à sua cadeia produtiva, sendo assim um setor impulsionador da economia nacional, não só pela quantidade de emprego que é capaz de gerar, mas também pela capacidade de abranger e movimentar outras áreas.

Tendo em vista a grande demanda referente à quantidade de energia e ainda aos recursos naturais utilizados atualmente pela construção civil, pode-se aferir que não é dada ainda a importância e preocupação necessária no que diz respeito à produção excessiva de resíduos. Verifica-se que é comum as empresas na área da construção civil basearem-se, na sua grande maioria, em métodos mais conservadores e tradicionais, assim como a falta de mão de obra qualificada.

Na construção civil, a produção de resíduos é praticamente inevitável, nos dias de hoje, especialmente porque não há uma prática popularizada para o seu reaproveitamento. Provavelmente a sua deposição será no meio ambiente, em locais inadequados,

causando impacte ecológico. Segundo BUTTLER (2003), o desperdício de materiais na construção civil pode chegar a 100% dos materiais utilizados em uma obra, o que mostra que em 2003 já se notava uma grande margem, e a necessidade de melhoras nos índices de reaproveitamento e redução de perdas. FISHER e WERGE (2009), citados por RODRIGUES (2009) afirmam que os resíduos de construção e demolição (RCD), como o aço, madeira, betão, alvenaria e plásticos, representavam em 2009, 31% da quantidade total de resíduos produzidos na União Europeia, equivalente a 850 milhões de toneladas anuais. Em dados mais atuais, o BIOIS (2010) afirma que a geração resíduos ronda 500 milhões de toneladas anuais no mesmo espaço, significando cerca de 25 a 30% de todos os resíduos produzidos.

O Regime Geral da Gestão de Resíduos (Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de Setembro), define RCD como: os resíduos resultantes de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação, demolição e da derrocada de edificações. O Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, que estabelece a terceira alteração do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro e transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, clarifica conceitos-chave como as definições de resíduo, prevenção, reutilização, preparação para a reutilização, tratamento e reciclagem, e a distinção entre os conceitos de valorização e eliminação de resíduos, prevê-se a aprovação de programas de prevenção e estabelecem-se metas de preparação para reutilização, reciclagem e outras formas de valorização material de resíduos, a cumprir até 2020.

O Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, introduz ainda na legislação portuguesa a diretiva sobre prevenção, produção e gestão de resíduos e prevê novas metas para a gestão de resíduos com o objetivo de fomentar a reutilização, reciclagem e outras formas de valorização dos resíduos. Assim os estados membros da UE devem tomar providências necessárias para alcançar um mínimo de 70% (em peso) na reutilização dos RCD, reciclagem ou outras formas de valorização até 2020.

Segundo RODRIGUES (2011), a Comissão Europeia identifica os RCD como um fluxo de resíduos prioritários para tratamento e reciclagem, devido à grande quantidade produzida e ao seu elevado potencial de reutilização como matéria-prima. A gestão e reciclagem adequada desses resíduos conduzem a uma redução do consumo de recursos naturais e conseqüentemente da quantidade de resíduos depositados em aterro.

Os resíduos da construção civil apresentam grande potencial para serem reciclados, pela quantidade disponível, e pela possibilidade da expansão do mercado de comércio

de RCDs. RODRIGUES (2011) escreve que, em Portugal, o Decreto Lei nº46/2008 de 12 de março estabelece o regime de gestão de RCD e que alterou a realidade do resíduos oriundos da construção, obrigando em obra a aplicação de uma metodologia de triagem ou encaminhamento para um operador licenciado. O decreto ainda proíbe a deposição desses resíduos sem a devida triagem, o que possibilita a reciclagem de resíduos como o plástico, papel, madeira e aço e possibilita a valorização e reutilização do material inerte, como betão, argamassa e pedras.

A reutilização de inertes em betão é especificado pelo LNEC E471 (2009), que define as propriedades e características de conformidade mínimas. A utilização de agregados grossos é consenso nos dias atuais, mesmo que em pequenas quantidades. No entanto, agregados finos (AFR), estão geralmente excluídos, tendo seu uso proibido, independentemente de sua função ou destino. O motivo para esta exclusão está ligado a diversos fatores, destacando-se a elevada quantidade de contaminantes, nomeadamente matéria orgânica e materiais leves. Os resíduos finos oriundos de obras possuem elevada taxa de materiais inertes; portanto, se os contaminantes forem removidos, acredita-se que o produto pode ser reutilizado no fabrico de betão.

Este trabalho pretende estudar o comportamento de um dos materiais mais tradicionais da construção civil, o comportamento do betão, quando são utilizados agregados finos reciclados e água de lavagem desses mesmos agregados para sua produção; com o objetivo de diminuir o impacte ambiental gerado tanto pelo desperdício dos RCD, quando pelo descarte dessa água.

## **1.2. Objetivos**

É objetivo deste trabalho demonstrar a viabilidade técnica da utilização de AFR de RCD que tenham sido previamente lavados, contrariando indicações regulamentares existentes, e também demonstrar a viabilidade da utilização de águas proveniente de lavagem dos AFR em amassaduras de betões, na tentativa de reduzir o consumo deste bem, assim como o impacte ambiental, e melhorar a pegada ecológica do betão.

Pretende-se ainda com este trabalho:

- avaliar as propriedades físicas e químicas dos agregados finos reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição, provenientes de uma central de reciclagem na região de Lisboa, Portugal;
- estudar o comportamento mecânico dos betões produzidos com AFR quanto à resistência à compressão e à tração por compressão diametral, comparando 4

famílias de betão produzidas com parâmetros diferentes, com variações nas quantidades de AFR utilizados e também na quantidade da água de amassadura oriunda de lavagem de resíduos empregadas;

- avaliar a influência dos AFR e a água de amassadura utilizada previamente na lavagem dos agregados finos na produção de betão.

### **1.3. Metodologia**

Os resíduos provenientes em da construção civil sofrem obrigatoriamente uma triagem e são separados em dois grandes grupos: fração inerte (betão, vidro, cerâmico) e fração não inerte (papel, madeira, metais ferrosos e não ferrosos), estabelecendo meios para o seu acondicionamento. A fração inerte pode ser separada dos contaminantes e matéria orgânica a partir de lavagem, porém esse processo representa um forte impacto ambiental tornando-o insustentável em termos ambientais e económicos. Assim, com o objetivo de diminuir este impacto ambiental que o processo acarreta pretende-se estudar o comportamento de betões produzidos com AFR provenientes de RCD, submetidos previamente a lavagem e utilizar a respetiva água de lavagem para o fabrico da amassadura do próprio betão.

A fim de dar resposta ao objetivo principal, primeiramente foram recolhidos e caracterizados resíduos de construção e demolição de uma central de reciclagem da região de Lisboa, a SGR – Sociedade Gestora de Resíduos. Pretende-se conhecer e avaliar as propriedades químicas, morfológicas e físicas dos resíduos, antes de proceder a sua lavagem, tendo como propósito separar os agregados finos reciclados dos contaminantes e da sua matéria orgânica. Foram determinadas as curvas granulométricas, massa volúmica, absorção de água, teor de finos e baridade. Esta análise permite encontrar argumentos para justificar os desempenhos dos betões produzidos com os dois tipos de AFR (lavados e não lavados).

Foram produzidos 3 conjuntos de famílias de betão, em que em cada uma terá variação de parâmetros de estudo, sendo nomeadamente:

- primeira família: betão com incorporação de AFR de RCD sem qualquer tipo de tratamento, e utilização de água de amassadura proveniente da rede pública;
- segunda família: betão com incorporação de AFR de RCD sujeitos a lavagem, e utilização de água de amassadura proveniente da rede pública (permitindo neste caso avaliar mudanças de desempenho conferidas pelo processamento dos AFR);

- terceira família: betão com incorporação de AFR de RCD, utilizando a água de lavagem dos AFR para a realização da amassadura, com período de decantação de 1 dia;
- Em todas as famílias foram realizados betões com diferentes taxas de substituição de areia natural por AFR, sendo respetivamente: 0, 25, 50 e 100%.

A Tabela 1.1 mostra uma relação das famílias de betões produzidos e as suas respetivas constituições.

*Tabela 1.1: Famílias de betões e constituições*

Famílias	% substituição de AFR			Tipo AFR	Tipo água	
1	0	25	50	100	Sem lavagem	Rede pública
2		25	50	100	Com lavagem	Rede pública
3	0	25	50	100	Com lavagem	Lavagem 1 dia

Nota-se uma particularidade: quando as famílias 1 e 2 possuem a percentagem de substituição de AFR a 0% os betões são iguais, uma vez que não existe qualquer substituição. Portanto nessa situação será produzido apenas uma série de provetes que atenderá aos requisitos.

Neste trabalho propõe-se a ensaiar os corpos de prova em termos de comportamento mecânico, em idades de referência, nomeadamente aos 7, 28 e 91 dias.

Os ensaios a serem realizados são:

- o ensaio de resistência à compressão, descrito na norma NP EN 12390-3 (2009) “Ensaio ao betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”.
- ensaio de compressão diametral descrito pela norma NP EN 12390-6 (2003) “Ensaio ao betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão dos provetes”.

## **1.4. Estrutura do trabalho**

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, cujo conteúdo se passa a descrever.

O presente capítulo, Capítulo 1, Introdução, é uma iniciação ao tema, com a apresentação do problema e relevância e a justificação para a sua escolha. Posteriormente enuncia-se os objetivos primordiais da presente dissertação. Por último elenca-se de forma sucinta a metodologia e a estruturação do trabalho.

O Capítulo 2, Estado da arte, é um enquadramento do tema, apresentando pesquisas existentes sobre comportamento de betões produzidos com agregados finos reciclados e suas características. Também são apresentados propriedades dos AFR estudadas por outros autores.

O Capítulo 3, Campanha experimental, descreve os materiais e campanha experimental realizada.

No Capítulo 4, Apresentação de resultados, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios, assim como sua análise, discussão e comparação com outros trabalhos previamente desenvolvidos.

O Capítulo 5, Considerações finais, será apresentada uma conclusão do trabalho, assim como possíveis conjecturas, com o intuito de contribuir para o desenvolvimento neste linha de investigação.

## 2. ESTADO DA ARTE

A construção civil atualmente é uma atividade importante para várias economias ao redor do mundo. Além do fator de geração de empregos, também possui o potencial de alavancar outros setores produtivos a partir do consumo de materiais. Apesar do desenvolvimento que o setor representa, ele provoca grandes impactos no meio ambiente.

Um dos maiores motivadores para a realização dessa pesquisa é a crença que não é dada a devida atenção à atividade da construção civil no que diz respeito à sustentabilidade. É sabido que a quantidade de desperdícios e resíduos gerados em obras é enorme, mas ainda existe muita dificuldade e irregularidades na deposição desse material. Uma possível resolução para esse problema é a reciclagem dos RCD.

É unânime o uso de agregados grossos reciclados na produção de betão, porém estudos acerca da produção do material com agregados finos reciclados são escassos pois existe um consenso que os AFR conduzem a perdas de desempenho significativas do material.

MEHTA e MONTEIRO (1994) citados por PEDROZO (2008) afirmam que o principal obstáculo para o uso dos resíduos de construção civil como agregados para betões é o custo da britagem, graduação, controle do pó e separação dos constituintes indesejados.

Na sua dissertação, PEDROZO (2008) afirma que vários países têm incentivado a reciclagem de resíduos de construção e demolição. A Tabela 2.1 apresenta quantidades de resíduos gerados e a parcela reciclada por alguns países membros da Comissão Europeia (CE). Verifica-se que Portugal e Espanha são os países que apresentam uma menor percentagem no que diz respeito ao reuso e reciclagem de RCD, contrariando os valores da Holanda que apresentam valores na ordem dos 90%, tendo em conta os valores de 2008. A Finlândia apresenta os valores mais baixos de produção de RCD e valor de reuso na ordem de 45%. Portugal se comparada à Dinamarca, possui produção de RCD similar, porém não consegue reutilizar ou reciclar na mesma proporção.

Tabela 2.1: *Produção e reciclagem de RCD na EU.* (PEDROZO, 2008)

<b>Produção e Reciclagem de RCD</b>			
<b>País membro</b>	<b>Produção RCD (em 1000 ton.)</b>	<b>% Reuso ou Reciclagem</b>	<b>% Incinerado ou aterrado</b>
Alemanha	59	17	83
Reino Unido	30	45	55
França	24	15	85
Itália	20	9	91
Espanha	13	<5	>95
Holanda	11	90	10
Bélgica	7	87	13
Portugal	3	<5	>95
Dinamarca	3	81	19
Suécia	2	21	79
Finlândia	1	45	55

No que diz respeito à origem, os RCD dividem-se usualmente em três tipos: resíduos de novas construções; resíduos de remodelação, reconstrução ou reabilitação; e resíduos de demolição de edificações (RUIVO e VEIGA, 2004, citados por RODRIGUES, 2011). A Tabela 2.2 mostra em percentagem a origem dos RCD na indústria da construção civil. É expectável que as demolições gerem maior quantidade de resíduos, pois isso é inerente à atividade.

Tabela 2.2: *Origem dos resíduos.* (Retirado de RUIVO e VEIGA, 2004; citado por RODRIGUES, 2011)

<b>Tipo</b>	<b>Percentagem (%)</b>
Resíduos de novas construções	10-20
Resíduos de remodelação, reconstrução e reabilitação	30-40
Resíduos de demolição	40-50

Nas novas construções, a utilização dos materiais deve ser planeada e quantificada previamente, pelo que o índice de resíduos passíveis de serem reutilizados como inertes será reduzido quando comparado com o de reabilitações e reconstruções

(RODRIGUES, 2011). A Tabela 2.3 mostra os tipos de resíduos, as suas origens e produtos classificados pelo tipo de obra.

Tabela 2.3: *Principais origens e tipos de resíduos da União Europeia.* (RODRIGUES, 2011)

<b>Tipo de Obra</b>	<b>Tipo de resíduos</b>	<b>Principais origens</b>	<b>Materiais que são normalmente recuperados</b>
Demolição	Alvenarias, betão armado e betão pré-esforçado, metais, madeira, cerâmicos, plásticos, vidro, produtos de gesso e estuque, ferragens e guarnições e materiais de isolamento	Edifícios residenciais e não residenciais, estruturas de engenharia civil (pontes, viadutos, chaminés, entre outros)	Metais para reciclagem, entulho para enchimentos, algumas ferragens e guarnições para reutilização de pequenas quantidades de tijolos
Construção	Solos e rocha, desperdícios de tijolos e outros cerâmicos, restos de betão, aço, madeira, tintas e embalagens	Trabalhos de movimentação de terras, desperdícios e restos de materiais de trabalhos de construção	Solos e rochas para enchimentos
Reparação e manutenção	Semelhantes aos resíduos de demolição: betão, alvenaria, solos e produtos betuminosos	Reabilitação e transformação de edifícios. Manutenção de sistemas de transporte	Semelhantes aos resíduos de demolição. Entulho para enchimentos

BRAVO (2016) cita em sua pesquisa uma investigação com origem na Noruega, que abrange mais de 300 construções com o objetivo de determinar a constituição dos resíduos de construção e demolição pelo tipo de atividade. A Tabela 2.4 a seguir apresenta os dados compilados por essa pesquisa.

Tabela 2.4: *Composição dos RCD por tipo de atividade, em percentagem por peso.* (Adaptado de Statistics Norway, 2006, obtido de BRAVO, 2016)

<b>Composição</b>	<b>Construção</b>	<b>Reabilitação</b>	<b>Demolição</b>	<b>Total</b>
Betão e tijolos	45.80	47.70	84.20	67.20
Madeira	13.70	30.30	6.40	14.60
Metal	1.30	3.60	4.30	3.60
Gesso	6.30	5.70	0.20	2.80
Papel, cartão e plásticos	4.50	0.90	0.30	1.10
Vidro	0.50	0.40	0.10	0.30
Isolamentos	1.90	0.50	0.10	0.50
Amianto	0.00	0.70	0.30	0.40
Outros resíduos perigosos	0.20	0.00	0.00	0.10
Outros	25.90	10.10	4.10	9.40

Vale ressaltar nos dados apresentados pelo autor a elevada quantidade de resíduos originários de betão e tijolos no ato da demolição.

## **2.1. Propriedades físicas dos agregados reciclados finos**

Segundo RODRIGUES (2011) os agregados naturais possuem características mais regulares de acordo com a rocha que o originou, já os agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição possuem uma heterogeneidade bastante vasta em sua composição. Diferentemente dos agregados naturais, os provenientes de RCD podem ser compostos por rochas de vários tipos diferentes, além de outros materiais como argamassas, que já sofreram transformações. O autor afirma que esses fatos fazem com que exista uma variação de características dos AFR em relação aos agregados naturais.

Como os agregados naturais, os agregados reciclados também devem ser avaliados, para que se possa conhecer as suas características antes de seu uso em betões. Foi identificado na bibliografia que as características mais estudadas dos AFR são: distribuição granulométrica; baridade e volume de vazios; absorção de água; massa volúmica; e textura superficial e forma dos grãos. Estas propriedades são neste sub capítulo apresentadas com base na literatura especializada.

### 2.1.1. Distribuição granulométrica

A granulometria aponta a distribuição das dimensões da partículas dos agregados e suas percentagens de ocorrência. Segundo ANGULO (2005), citado por RODRIGUES (2011), a granulometria dos agregados reciclados são distintas de acordo com o equipamento utilizado no processo de britagem, e a composição dessa amostra.

RODRIGUES e FUCALÉ (2014) estudaram betões produzidos com agregados finos reciclados de resíduos da construção civil, experimentando a substituição de 0%, 50% e 100% do agregado convencional. Este estudo permitiu conhecer propriedades desses materiais e como estas características se relacionam com os AFR. A composição dos AFR utilizados nesse estudo é caracterizada pela fração passante no peneiro de malha #2.4mm (escala ASTM), os resíduos são oriundos de uma obra de edificação residencial obtidos na etapa de estruturas, e este material sofreu redução dimensional por meio de um britador de mandíbulas de escala laboratorial. A Tabela 2.5 apresenta a composição do resíduo de construção civil que originou o agregado fino reciclado.

Tabela 2.5: *Constituição de RCD da amostra que origina o AFR. (RODRIGUES e FUCALÉ, 2014)*

<b>Constituinte</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>Percentagem (%)</b>
Material miúdo*	26.24	3
Tijolo cerâmico	34.70	4
Argamassa	11.00	1
Betão	686.42	69
Misto**	232.68	23
Total	991.55	100

\* Material que passa no peneiro # 4,8 mm (escala ASTM). \*\* Material incorporado de difícil distinção (argamassa + tijolo).

O estudo de RODRIGUES e FUCALÉ (2014) mostra a partir da Tabela 2.5 que os AFR provenientes de RCD são compostos por diferentes tipos de materiais, o que confirma RODRIGUES (2011), quando afirma que esses agregados possuem características diferentes dos agregados naturais, especialmente devido à natureza de sua composição.

A Figura 2.1 mostra a curva granulométrica obtida ao comparar os tipos de agregados: grosso (gráudo), finos (miúdo) e finos reciclados RODRIGUES e FUCALÉ (2014).

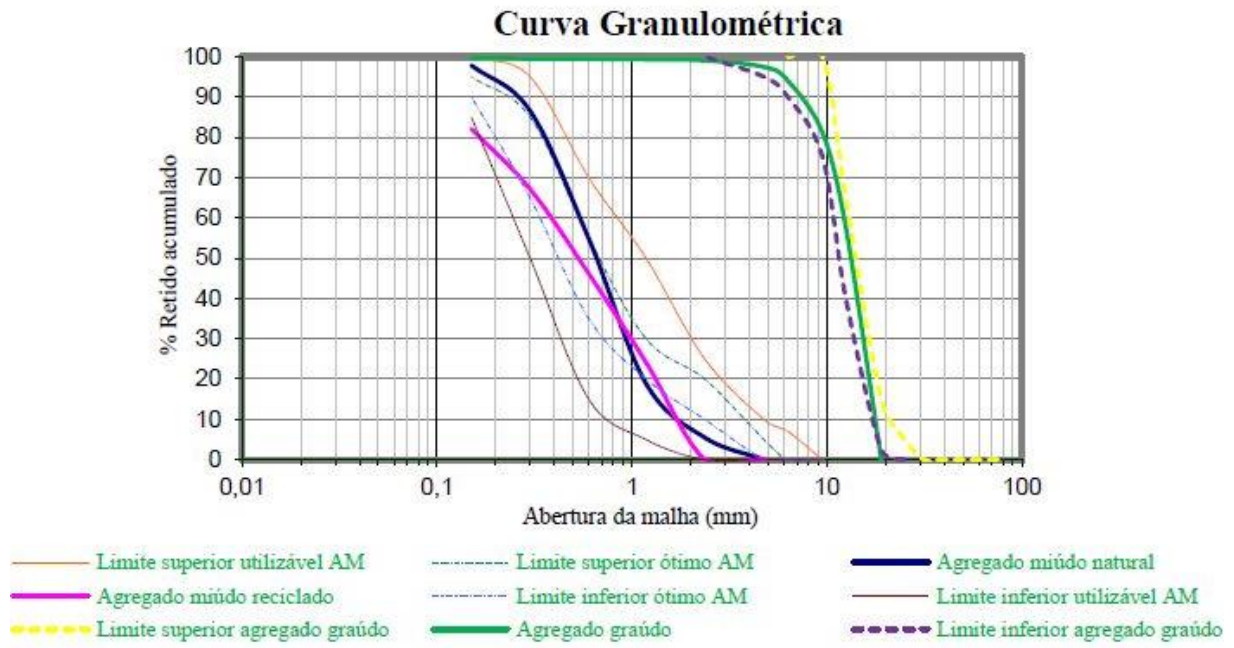


Figura 2.1 - Curva granulométrica de agregados finos e grossos (RODRIGUES e FUCALE, 2014)

Analisando a curva obtida pelos autores e a composição do agregado, majoritariamente betão, 69% de acordo com a Tabela 2.3, nota-se que apesar de as curvas do AFR e do agregado natural serem similares, o AFR apresenta-se com menores dimensões dos grãos e com maior continuidade. Podendo ser resultado do que foi referido anteriormente, tipo de britagem ou até mesmo pela composição dos AFR.

Segundo LIMA (1999) citado por PEDROZO (2008), a composição granulométrica dos agregados finos varia conforme a natureza do resíduo que o origina, os equipamentos utilizados na separação e as dimensões das partículas antes do processamento. A melhor forma para o uso de AFR é a peneiração do material, na tentativa de obter-se curvas similares às do agregado natural segundo o autor.

PEDROZO (2008) apresenta que nos estudos de MIRANDA e SELMO (2006) foi identificado que agregados reciclados oriundos de blocos de betão possuem uma composição granulométrica mais contínua que os agregados provenientes de alvenaria, sendo assim melhores para utilização em argamassas.

A composição granulométrica dos agregados reciclados deve atender as mesmas exigências do que os agregados naturais. É uma propriedade muito importante devido a que podem influenciar na trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de aglomerantes, absorção de água, permeabilidade, entre outras (TOPÇU, 2004, citado por PEDROZO, 2008). A figura 2.2 apresenta a curva granulométrica dos agregados

finos reciclados e naturais observados no seu trabalho, e segundo ele é possível observar a continuidade da distribuição, já que a amostra foi corrigida através de peneiração.

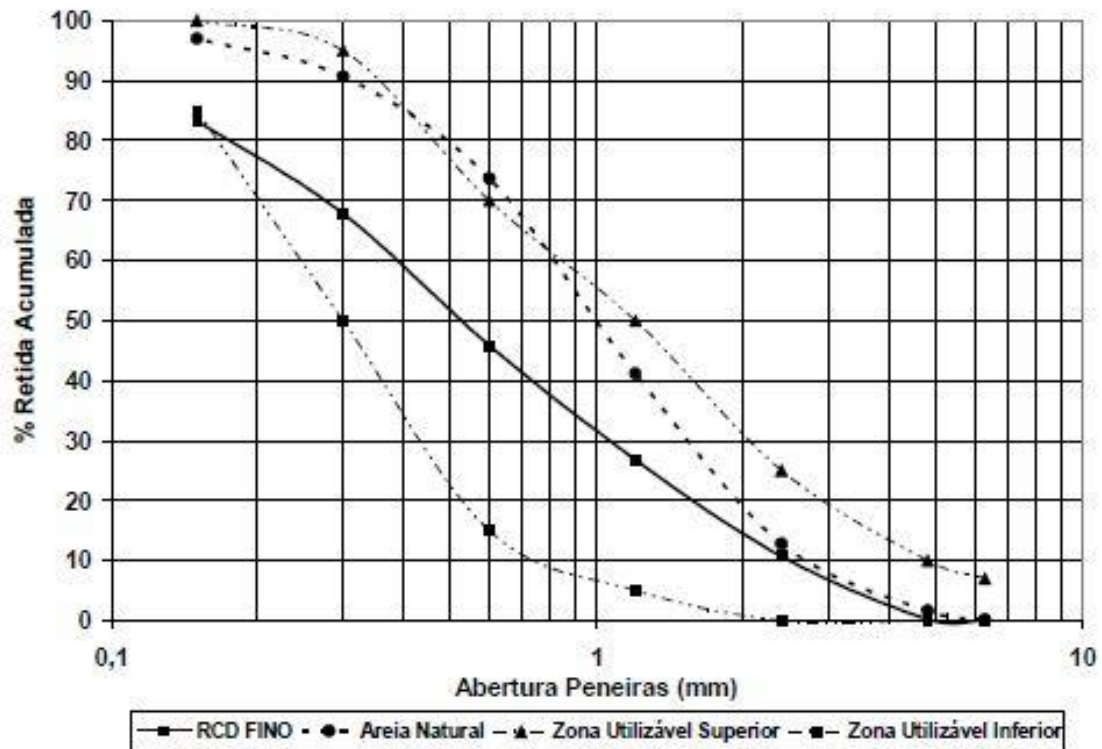


Figura 2.2 - Curva granulométrica agregados finos reciclados e naturais (PEDROZO, 2008)

PEDROZO (2008) ainda observa que houve uma grande quantidade de finos que passaram no peneiro de abertura 0,15 mm nos AFR em relação ao agregado fino natural, este material apresenta uma maior superfície específica, o que acarreta em maior consumo de água na mistura.

RODRIGUES (2011) ensaiou 10 amostras de AFR obtidos em centrais de gestão de resíduos na região de Lisboa, Portugal, de acordo com a NP EN 933-2. A seguir apresenta-se os resultados desses ensaios. A Tabela 2.5 mostra a distribuição granulométrica da primeira amostra, da empresa Ambilei e a Figura 2.3 a respetiva curva granulométrica.

Tabela 2.6: *Distribuição granulométrica da amostra Ambilei – agregados com origem em betões*. (RODRIGUES, 2011).

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	1.102	9.260
16	1.865	15.680
8	2.691	22.620
4	1.812	15.230
2	1.114	9.360
1	1.079	9.070
0.5	0.952	8.000
0.25	0.654	5.500
0.125	0.339	2.850
0.063	0.019	1.580
Fundo	0.087	0.730
Total	11.880	99.880

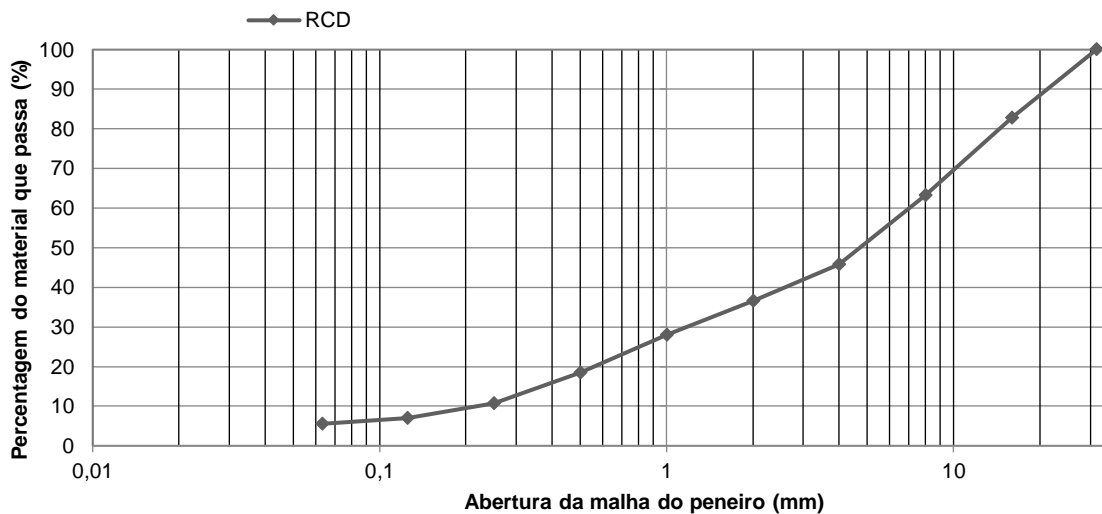


Figura 2.3 - Curva granulométrica amostra Ambilei – agregados com origem em betões. (Adaptado de RODRIGUES, 2011).

A Tabela 2.7 mostra a distribuição granulométrica da segunda amostra da empresa Ambilei, a diferença é que a origem desse grupo são os resíduos de construção e demolição ao invés de betões; e a Figura 2.4 a respetiva curva granulométrica (RODRIGUES, 2011).

Tabela 2.7: Distribuição granulométrica da amostra Ambilei – agregados com origem em RCD . (RODRIGUES, 2011).

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	1.538	11.570
16	2.114	15.900
8	2.119	15.940
4	1.588	11.940
2	1.189	8.940
1	1.083	8.140
0.5	1.529	11.500
0.25	1.161	8.730
0.125	0.568	4.270
0.063	0.292	2.200
Fundo	0.076	0.570
Total	13.260	99.720

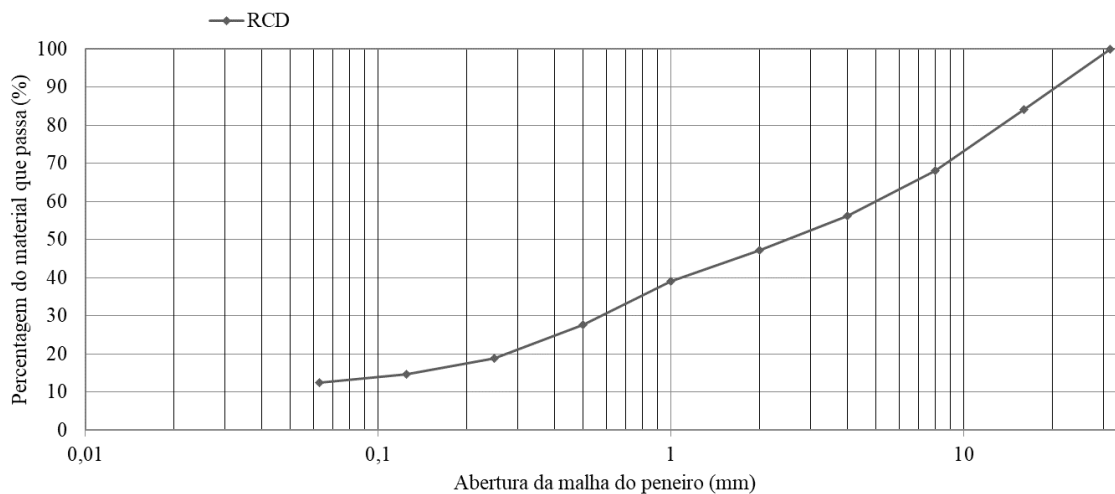


Figura 2.4 - Curva granulométrica amostra Ambilei – agregados com origem em RCD. (Adaptado de RODRIGUES, 2011).

Apesar das amostras da mesma central serem de origens diferentes não se nota uma grande diferença nas curvas obtidas nos ensaios. Percebe-se uma maior quantidade de partículas retidas não peneiras de maior abertura nos agregados com origens nos RCD, pois segundo LEITE (2001), betões com maior período de endurecimento tendem a gerar produtos de britagem mais finos. Outro fato a se notar é a maior quantidade de

finos presentes no agregado com origem nos RCD. Segundo RODRIGUES (2011), a existência de argamassas nos RCD faz com que agregados reciclados se quebrem com mais facilidade que os agregados naturais, o que justificaria a presença de grãos menores na primeira amostra. MONTGOMERY (1998), citado por LEITE (2001) afirma que as partículas com diâmetros menores que 0.15 mm nos RCD tem maior chance de serem compostos por partículas não hidratadas de cimento, refere ainda que a utilização desses finos pode incrementar a quantidade de cimento na produção dos betões, embora saliente que é praticamente impossível a determinação dessas quantidades existentes de cimento. Na sua pesquisa BRAVO (2016) também ensaiou amostra proveniente de RCD da Ambilei, os resultados estão apresentados na Tabela 2.8, e na Figura 2.5.

Tabela 2.8: *Distribuição granulométrica da amostra Ambilei.* (Adaptado de BRAVO, 2016).

<b>Abertura da malha (mm)</b>	<b>Passado (%)</b>	<b>% retida</b>
31.5	100.000	0.000
16	100.000	0.000
8	100.000	1.800
4	96.400	1.800
2	65.800	30.600
1	46.400	19.400
0.5	31.800	14.600
0.25	23.000	8.800
0.125	15.000	8.000
0.063	4.900	10.100
Fundo	0.000	4.900

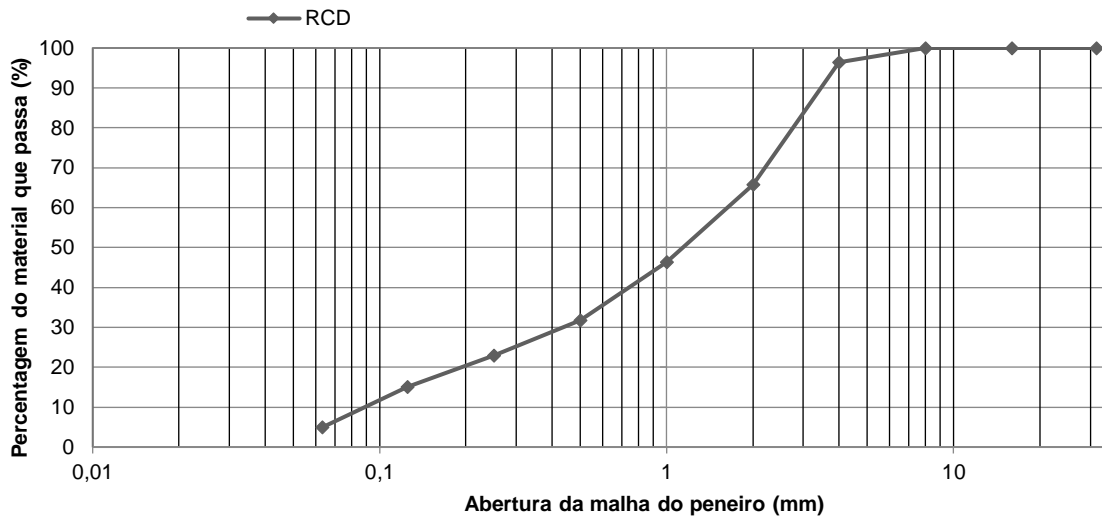


Figura 2.5 - Curva granulométrica amostra Ambilei – agregados com origem em RCD. (Adaptado de BRAVO, 2016).

A Tabela 2.9 mostra a composição do RCD da Ambilei obtida por BRAVO (2016).

Tabela 2.9: *Composição do RCS amostra Ambilei.* (Adaptado de BRAVO, 2016).

Composição (%)	AFR Ambilei
Betão, argamassa e pedra natural	83.7
Alvenaria - materiais argilosos	0.9
Vidro	15.4
Materiais betuminosos	0
Outros	0

BRAVO (2016) observa que a curvas dos AFR é diferente da curva dos AN, e que não existe um padrão verificado para os AR, diferentemente dos AN. Ainda que os AN possuem uma granulometria em geral mais uniforme, enquanto os AFR possuem a propriedade mais extensa. Essa inexistência de uma tendência para as curvas granulométricas dos AFR pode ser verificada ao se comparar os resultados obtidos por diferentes autores aqui apresentados nesse trabalho.

Segundo BRAVO (2016), a norma NP EN 206-1 (2007) informa que não é aconselhado o uso de agregados de granulometria extensa com máxima dimensão menor do que 45 mm, em betões com classes de resistência maiores que C12/15.

A Figura 2.6 apresenta a comparação das curvas granulométricas obtidas por RODRIGUES (2011), e BRAVO (2016) relativas às amostras da Ambilei.

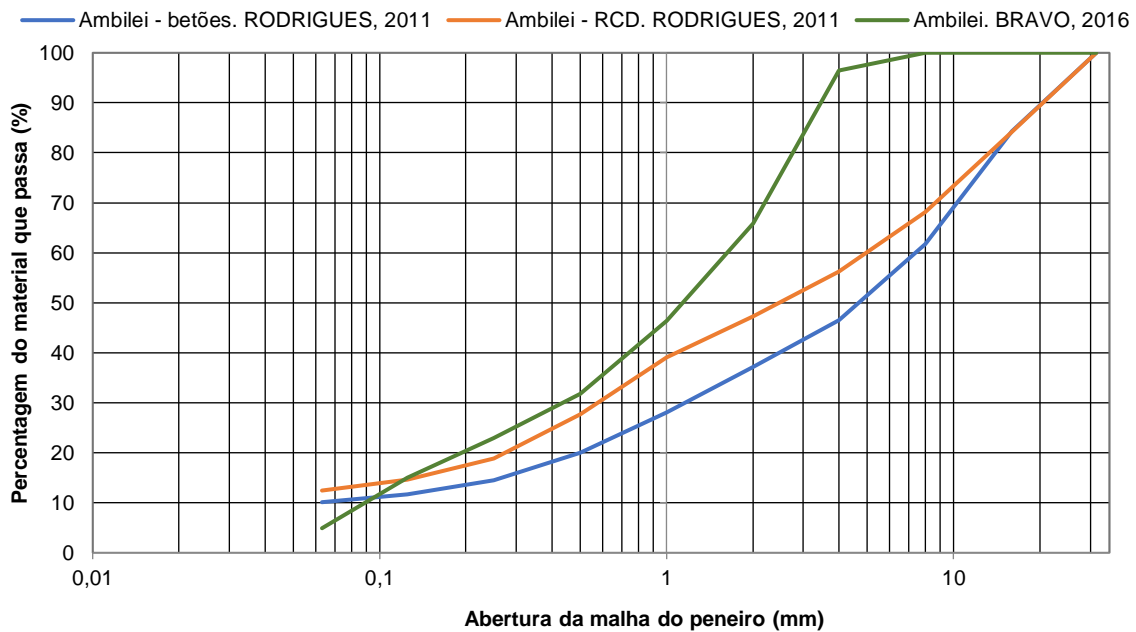


Figura 2.6 – Comparação entre curvas granulométrica das amostras Ambilei.

Ao compararmos as curvas obtidas (Figura 2.6), verifica se que o AFR estudado por Bravo possui uma granulometria mais contínua que os estudados por Rodrigues, embora sejam provenientes da mesma central, esse material pode ter a composição diferente, uma vez que é indicado pelo autor que nessa amostra foi encontrada uma quantidade muito menor de material cerâmico do que nas outras amostras.

A Tabela 2.10 apresenta os resultados obtidos para a amostra da central Arvela e a Figura 2.7 a seguir mostra a curva granulométrica da amostra obtida na central Arvela.

Tabela 2.10: *Distribuição granulométrica da amostra Arvela – agregados com origem em RCD*. (RODRIGUES, 2011).

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	0.762	5.140
16	2.539	17.140
8	2.916	19.680
4	2.588	17.470
2	1.344	9.080
1	1.279	8.630
0.5	1.406	9.490
0.25	1.152	7.780
0.125	0.548	3.700
0.063	0.221	1.490
Fundo	0.051	0.340
Total	14.810	99.950

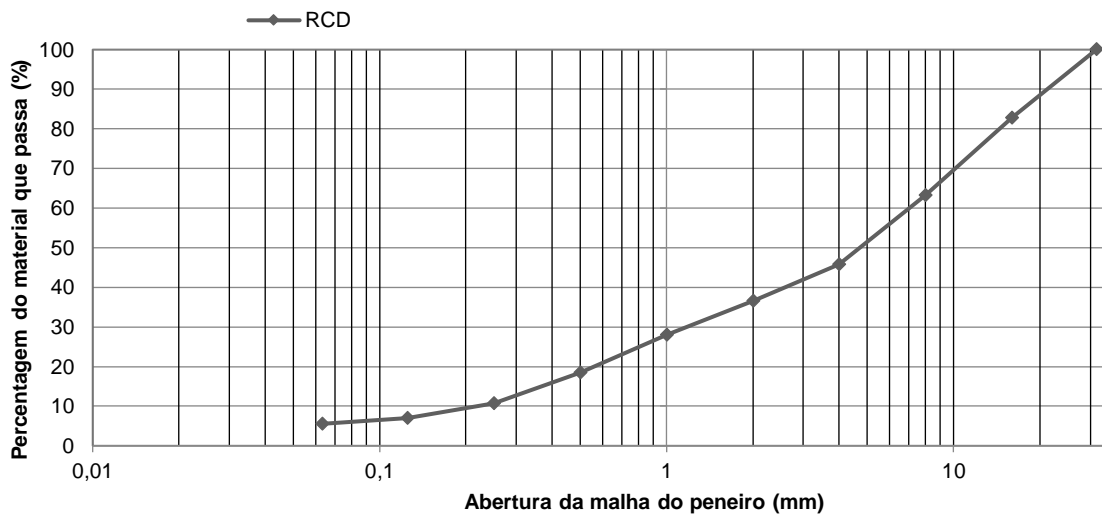


Figura 2.7 - Curva granulométrica amostra Arvela – agregados com origem em RCD. (Adaptado de RODRIGUES, 2011)

A Tabela 2.11 a seguir apresenta a distribuição da granulometria da amostra da central de gestão de resíduos Retria e a Figura 2.8 mostra a curva granulométrica da amostra da Retria.

Tabela 2.11: *Distribuição granulométrica da amostra Retria – agregados com origem em RCD.* (RODRIGUES, 2011).

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	0.648	7.210
16	2.019	22.480
8	1.580	17.600
4	1.139	12.680
2	0.783	8.720
1	0.764	8.500
0.5	0.843	9.390
0.25	0.629	7.000
0.125	0.388	4.320
0.063	0.132	1.470
Fundo	0.042	0.460
Total	8.970	99.850

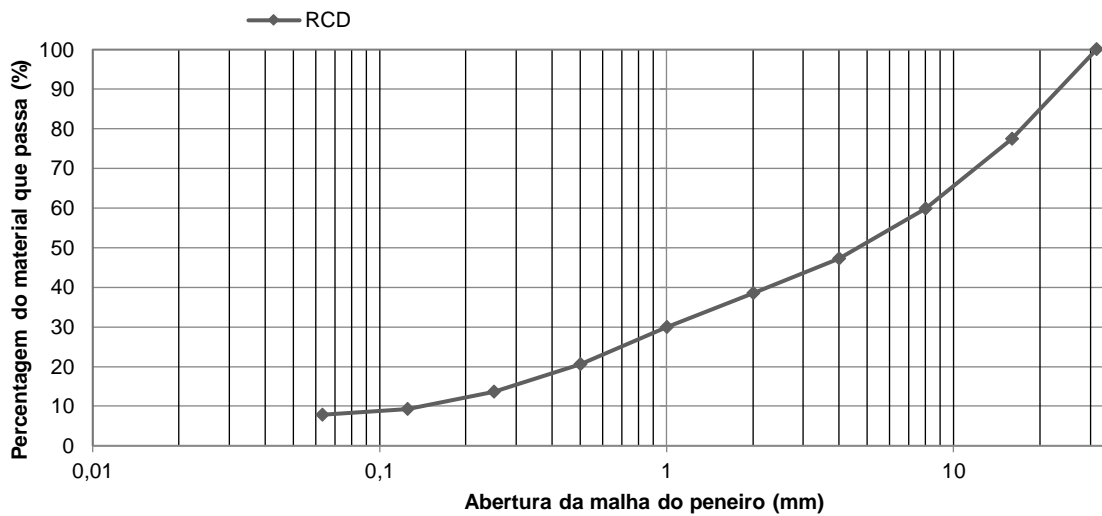


Figura 2.8 - Curva granulométrica amostra Retria – agregados com origem em RCD. (Adaptado de RODRIGUES, 2011)

A Tabela 2.12 mostra a distribuição granulométrica da amostra da Trianovo e a Figura 2.9 mostra a curva da granulometria da amostra da Trianovo.

Tabela 2.12: Distribuição granulométrica da amostra Trianovo – agregados com origem em RCD. (RODRIGUES, 2011).

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	0.000	0.000
16	3.199	31.320
8	2.282	22.340
4	1.293	12.650
2	0.690	6.760
1	0.741	7.250
0.5	0.782	7.650
0.25	0.663	6.490
0.125	0.306	2.990
0.063	0.123	1.200
Fundo	0.098	0.960
Total	10.180	99.620

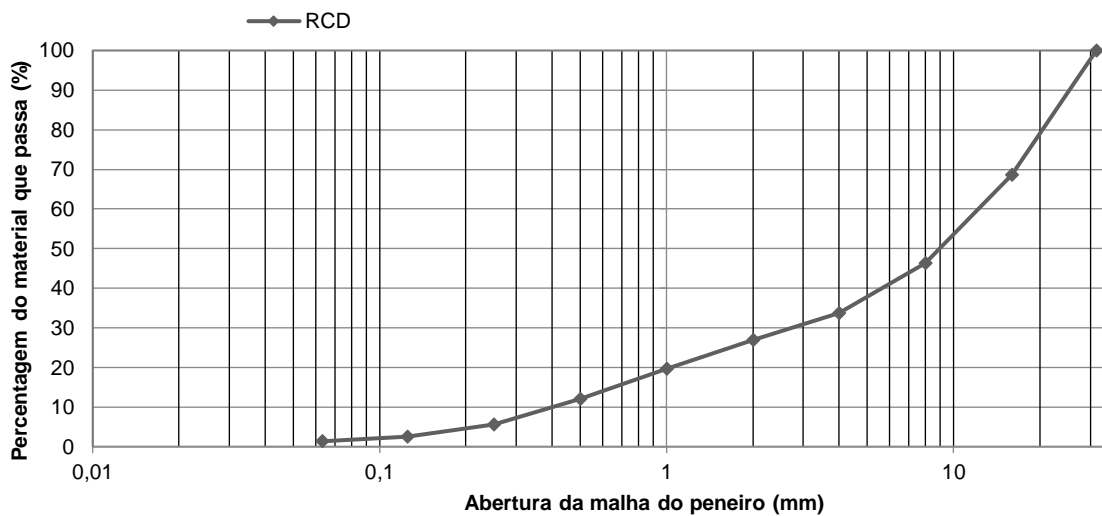


Figura 2.9 - Curva granulométrica amostra Trianovo – agregados com origem em RCD. (Adaptado de RODRIGUES, 2011)

Pode-se perceber que as amostras da Arvela, Retria e Trianovo possuem granulometrias com valores próximos. As variações existentes devem-se às diferenças nas composições dos RCD, e ao processo de britagem executado pelas empresas.

Das centrais de reciclagem estudadas por RODRIGUES (2011), a SGR e a Vimajas produzem agregados com diferentes granulometrias. A Tabela 2.13 a seguir mostra a

distribuição granulométrica da primeira amostra da SGR e a Figura 2.10 mostra a curva da granulometria da primeira amostra da SGR.

Tabela 2.13: *Distribuição granulométrica da amostra Sociedade Gestora de Resíduos – agregados com origem em RCD #1.* (RODRIGUES, 2011).

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	0.000	0.000
16	0.000	0.000
8	0.502	6.270
4	0.836	10.440
2	0.695	8.680
1	1.120	14.000
0.5	1.895	23.680
0.25	1.773	22.150
0.125	0.616	7.690
0.063	0.391	4.880
Fundo	0.159	1.990
Total	7.990	99.790

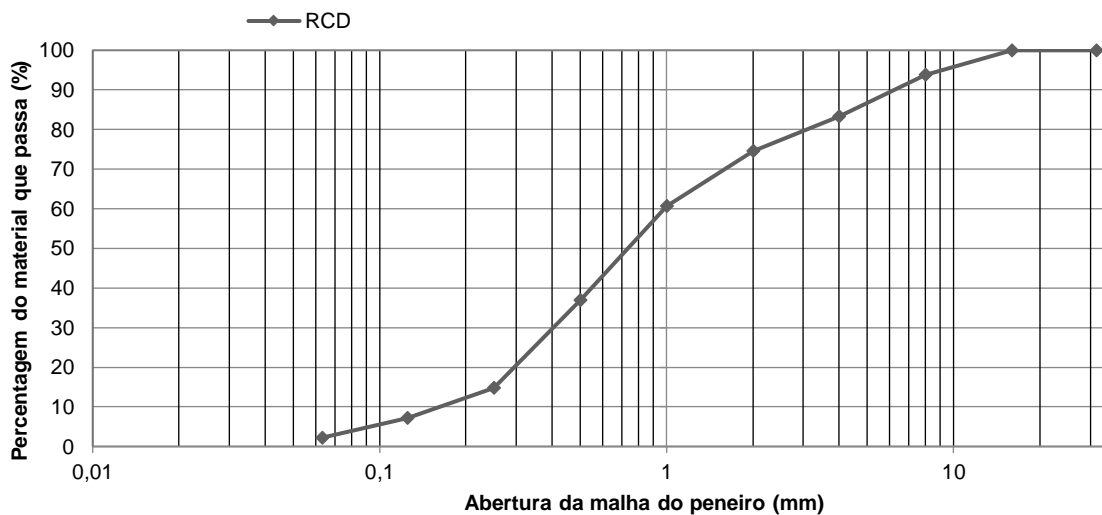


Figura 2.10 - Curva granulométrica amostra SGR#1 – agregados com origem em RCD. (Adaptado de RODRIGUES, 2011)

A Tabela 2.14 mostra a distribuição granulométrica da segunda amostra da SGR e a Figura 2.11 a seguir apresenta a curva granulométrica da segunda amostra da SGR.

Tabela 2.14: *Distribuição granulométrica da amostra Sociedade Gestora de Resíduos – agregados com origem em RCD #2.* (RODRIGUES, 2011).

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	0.000	0.000
16	3.620	38.520
8	2.225	23.680
4	0.695	7.400
2	0.365	3.880
1	0.432	4.590
0.5	0.917	9.760
0.25	0.618	6.570
0.125	0.275	2.930
0.063	0.150	1.600
Fundo	0.048	51.000
Total	9.340	99.450

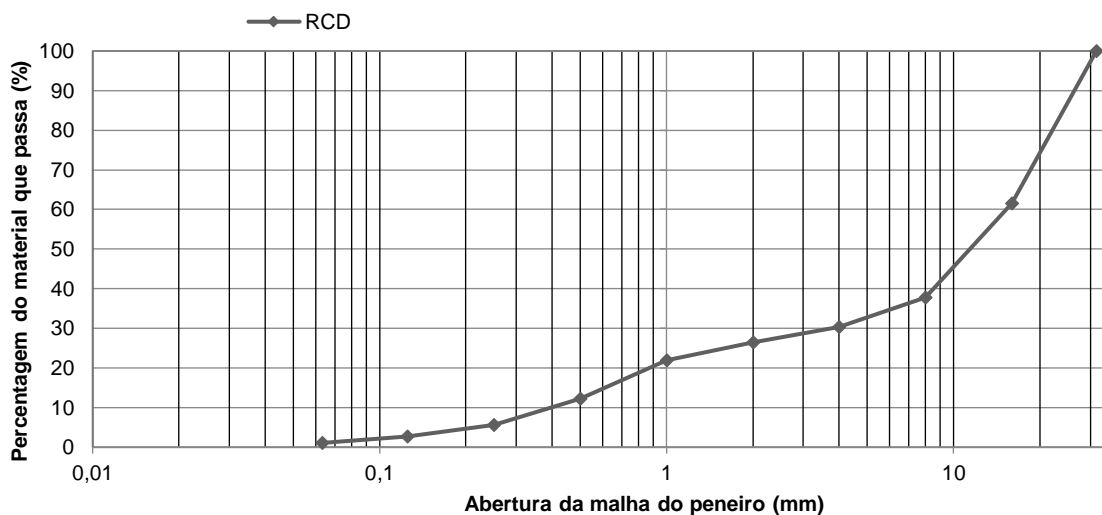


Figura 2.11 - Curva granulométrica amostra SGR#2 – agregados com origem em RCD. (Adaptado de RODRIGUES, 2011)

Na amostra do primeiro crivo da SGR (Tabela 2.13 e Figura 2.10) mais de 60% dos grãos possuem dimensão inferior a 1 mm. Na segunda amostra (Tabela 2.14 e Figura 2.11) nota-se a presença de grãos maiores que 8 mm. Essa segunda amostra mostra-se mais parecida com as amostras das outras centrais de reciclagem estudadas por RODRIGUES (2011), a amostra SGR#1 é diferente da maioria das amostras, possuindo uma parcela maior de material fino.

A Tabela 2.15 mostra a distribuição granulométrica da amostra da Valnor e a A Figura 2.12 apresenta a curva granulométrica da amostra da Valnor.

Tabela 2.15: *Distribuição granulométrica da amostra Valnor – agregados com origem em RCD.* (RODRIGUES, 2011).

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	0.220	2.450
16	3.803	42.380
8	3.318	36.970
4	0.837	9.320
2	0.165	1.840
1	0.105	1.170
0.5	0.118	1.310
0.25	0.113	1.260
0.125	0.104	1.150
0.063	0.097	1.080
Fundo	0.077	0.860
Total	8.960	99.790

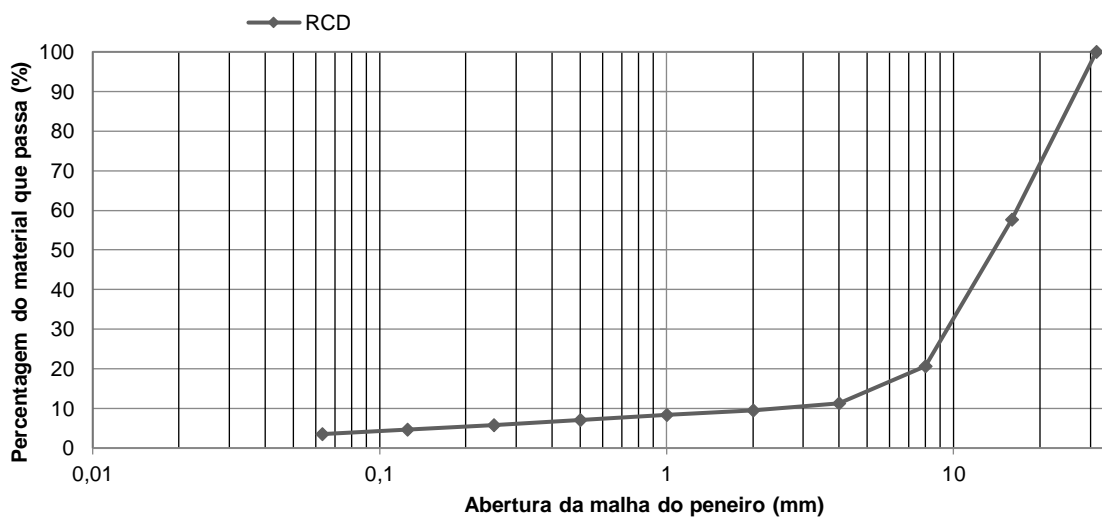


Figura 2.12 - Curva granulométrica amostra Valnor – agregados com origem em RCD. (Adaptado de RODRIGUES, 2011)

A amostra da Valnor difere as características das demais amostras das outras centrais de reciclagem. Segundo RODRIGUES (2011), isso ocorre pois existe um crivo após a

britagem dos RCD na central, de abertura do peneiro de 10 mm, que remove grande parte dos finos, o que faz com que a percentagem dessas partículas seja menor que nas outras amostras mostradas anteriormente. Ainda segundo o autor nas outras centrais quando um crivo é utilizado no processo de fragmentação, a abertura do peneiro é menor. Esse fenômeno observado nessa amostra é um bom exemplo de como o processo de britagem dos RCD pode acarretar em modificações significativas na granulometria do material.

RODRIGUES (2011) ainda observa que a Arvela, Ambilei, Trianovo e Retria utilizam diferentes máquinas no processo de fragmentação dos RCD. Enquanto a primeira utiliza um moinho de martelo, as outras utilizam britadeiras de maxilas. Nas amostras dessas centrais não se observa grandes distinções nas propriedades granulométricas, o que leva o autor a concluir que a distribuição da granulometria sofre pouca influência pelas máquinas de britagem. Por outro lado o uso de crivos com aberturas diferentes influencia significativamente na granulometria dos agregados.

A Tabela 2.16 mostra a distribuição granulométrica da primeira amostra da central Vimajas e a Figura 2.13 mostra a curva granulométrica da primeira amostra da central Vimajas.

Tabela 2.16: *Distribuição granulométrica da amostra Vimajas – agregados com origem em RCD #1. (RODRIGUES, 2011).*

<b>Abertura da malha (mm)</b>	<b>Massa retida (kg)</b>	<b>% retida</b>
31.5	0.000	0.000
16	0.000	0.000
8	0.000	0.000
4	0.330	21.260
2	0.357	22.970
1	0.305	19.630
0.5	0.261	16.780
0.25	0.159	10.250
0.125	0.070	4.530
0.063	0.039	2.510
Fundo	0.031	1.960
Total	1.550	99.890

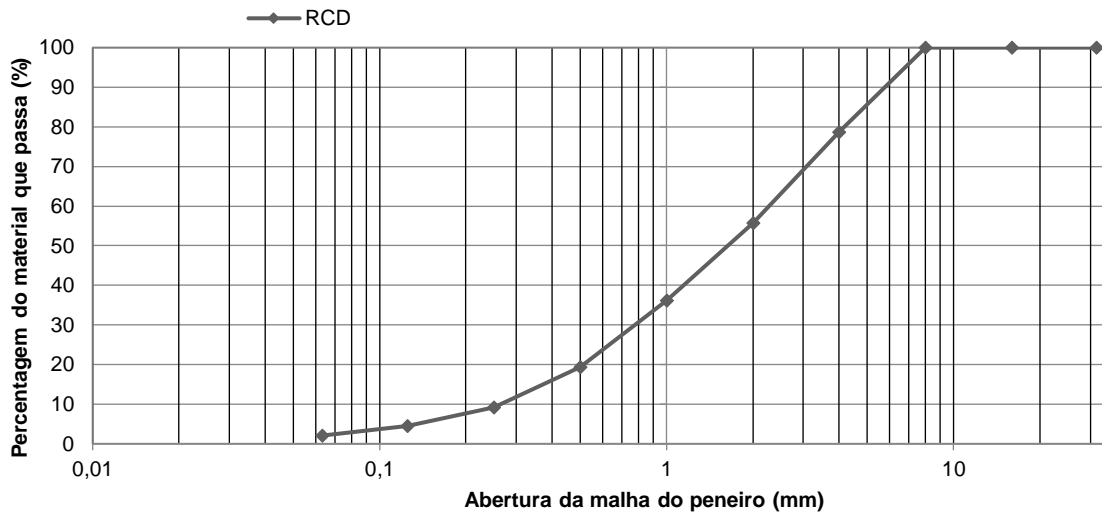


Figura 2.13 - Curva granulométrica primeira amostra Vimajas – agregados com origem em RCD#1. (Adaptado de RODRIGUES, 2011)

A Tabela 2.17 mostra a distribuição granulométrica da segunda amostra da central Vimajas e Figura 2.14 mostra a curva granulométrica da segunda amostra da central Vimajas.

Tabela 2.17: Distribuição granulométrica da amostra Vimajas – agregados com origem em RCD #2. (RODRIGUES, 2011).

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	0.000	0.000
16	0.609	5.580
8	4.675	42.810
4	3.211	29.400
2	0.797	7.300
1	0.609	5.580
0.5	0.394	3.610
0.25	0.262	2.400
0.125	0.155	1.420
0.063	0.111	1.010
Fundo	0.070	0.640
Total	10.890	99.750

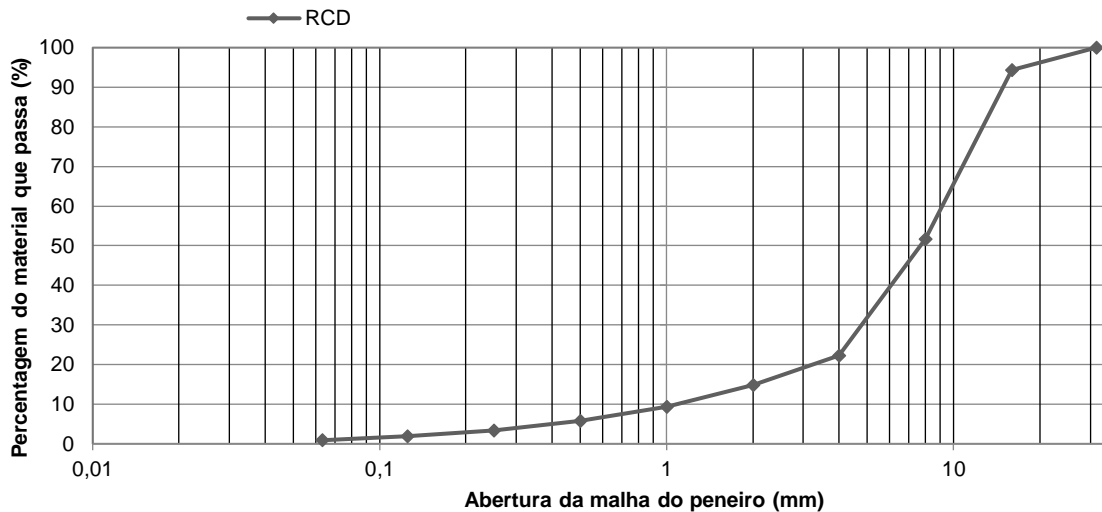


Figura 2.14 - Curva granulométrica segunda amostra Vimajas – agregados com origem em RCD. (Adaptado de RODRIGUES, 2011)

Percebe -se que a primeira amostra da Vimajas apresenta 100% das partículas abaixo de 8 mm, o que pode ser justificado pelo uso de um crivo no processo de britagem como já observado anteriormente na primeira amostra da SGR (Figura 2.10 e Tabela 2.13). Já a segunda amostra (Figura 2.11 e tabela 2.14) da Vimajas apresenta uma pequena quantidade de grãos inferiores a 8 mm. Segundo RODRIGUES (2011) essa amostra é um agregado de granulometria discreta, sendo que parte significativa das partículas se encontra com dimensões entre 8 e 16 mm.

As primeiras amostras das centrais de reciclagem SGR e Vimajas são mais finas que as segundas amostras das respectivas empresas. RODRIGUES (2011) aponta que as distribuições granulométricas das amostras do primeiro crivo são substancialmente diferentes das outras amostras de outras centrais estudadas por este autor.

Ainda segundo RODRIGUES (2011) os resultados por ele obtidos estão de acordo com os que foram encontrados por ANGULO (2005), que afirma que os RCD devem possuir aproximadamente 40% de fracção fina, para que a produção desse agregados provenientes de RCD sejam viáveis economicamente para uma central de reciclagem.

A Tabela 2.18 a seguir mostra a distribuição granulométrica encontrada por BRAVO (2016) ao analisar AFR proveniente da central Vimajas.

Tabela 2.18: *Distribuição granulométrica da amostra Vimajas. (Adaptado de BRAVO, 2016).*

<b>Abertura da malha (mm)</b>	<b>% passada</b>	<b>% retida</b>
31.5	100.000	0.000
16	100.000	0.000
8	100.000	0.000
4	85.400	14.600
2	69.200	16.200
1	53.000	16.200
0.5	29.800	23.200
0.25	12.700	17.100
0.125	5.100	7.600
0.063	2.200	2.900
Fundo	0.000	2.200

A Tabela 2.19 mostra a composição do AFR proveniente da central Vimajas.

Tabela 2.19: *Composição do RCD amostra Vimajas. (Adaptado de BRAVO, 2016).*

<b>Composição (%)</b>	<b>AFR Vimajas</b>
Betão, argamassa e pedra natural	75.2
Alvenaria - materiais argilosos	11.6
Vidro	1.0
Materiais betuminosos	10.5
Outros	1.7

A Figura 2.15 apresenta a comparação das curvas granulométricas obtidas por RODRIGUES (2011), e BRAVO (2016) relativas às amostras da Vimajas.

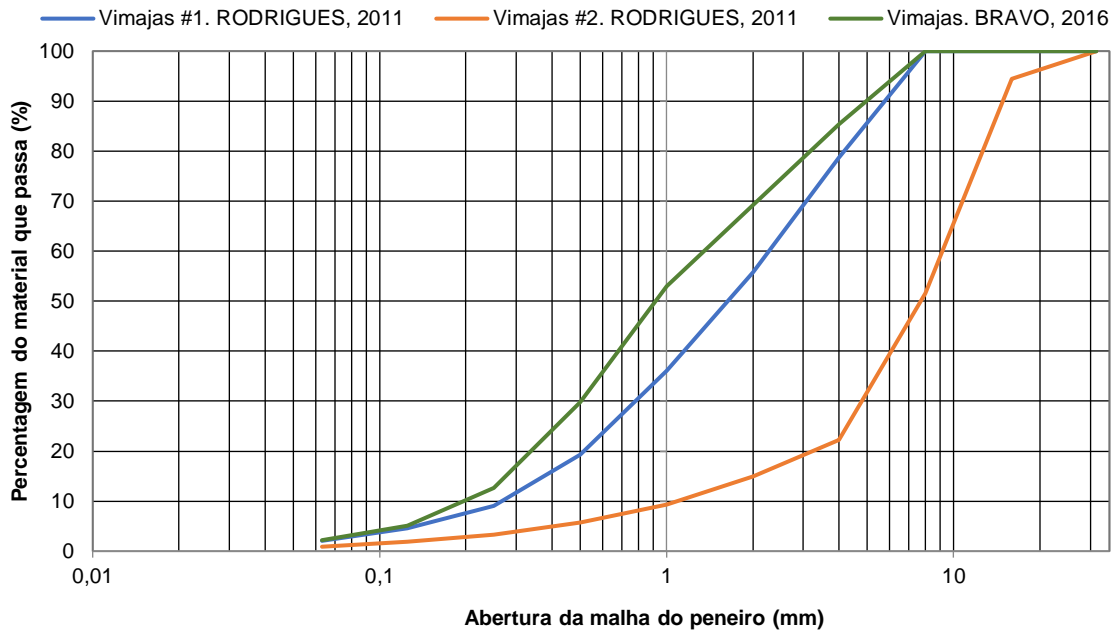


Figura 2.15 – Comparação entre curvas granulométrica das amostras Vimajas.

No caso das amostras da central Vimajas nota-se que as amostras de BRAVO (2016) (Tabela 2.18) e a segunda amostra de RODRIGUES (2011) (Tabela 2.17) são similares, enquanto a amostra do primeiro crivo do segundo autor destoa das demais. É provável que a segunda amostra de RODRIGUES (2011), possua a composição diferente de sua primeira amostra, o que explica a diferença na curva granulométrica. É possível que as amostras similares obtidas pelos autores tenham composição parecida, e que o fato da central fornecer mais de uma dimensão de agregados faz com que exista um certo padrão nas características granulométricas dos materiais, mesmo os que foram obtidos com alguns anos de diferença.

RODRIGUES (2011) afirma que segundo a Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, a distribuição granulométrica dos agregados que foram estudados por ele é semelhante, e possuem um padrão de granulometria extensa. O autor ainda aponta que é desejável esse tipo de granulometria na produção de betões, mas salienta que esta deve ser obtida por uma mistura de agregados de granulometrias reduzidas e conhecidas, e não por introdução direta de agregados com granulometrias extensas. O mesmo autor sugere que os betões produzidos com esses agregados estudados tenham o seu uso restrito a betões de limpeza ou com pouca exigência estrutura, e que, para que haja a possibilidade de se produzir betões com melhor qualidade, deve se

selecionar um intervalo de dimensão dos grãos dos agregados a partir de um processamento posterior ao feito pelas centrais de reciclagem.

Percebe-se que é difícil estabelecer um padrão de granulometria para RCDs, uma vez que esse tipo de material depende bastante de sua origem e tratamento. Porém pode-se submeter os resíduos à passagem por peneiros de forma a se separar uma faixa de tamanho dos grãos, e é sabido que esses resíduos quando possuem uma granulometria extensa, consegue-se melhores resultados no fabrico de betão.

### 2.1.2. Baridade e volume de vazios

A baridade é definida como a massa por unidade de volume aparente de um conjunto de agregados, e segundo ele, ela varia de acordo com a compactação, com a granulometria e também com a forma dos grãos do agregado.

Uma baridade maior dos agregado implica em um betão com melhor desempenho, pelo fato desse material apresentar uma granulometria mais contínua, fazendo com que os grãos ocupem melhor os espaços, e conseqüentemente obtendo-se um menor índice de vazios.

Segundo ALVES (2007), baridade é a massa por unidade de volume aparente de um agregado. Na sua pesquisa, cita ROSA (2002), que encontrou densidade menores de agregados reciclados com origem em cerâmicos em relação aos agregados naturais. Segundo a autora, o agregado estudado quando seco ao ar possui uma baridade parecida com a o agregado seco até a massa constante em estufa, e ainda sugere que é preciso saturar esse agregado antes da produção do betão. Esta pré-saturação seria necessária pois seria uma maneira de aproximar os valores de baridade dos agregados reciclados e dos agregados naturais. A Tabela 2.20 mostra os valores obtidos na campanha.

Tabela 2.20: *Baridade dos agregados*. (Obtido por ROSA, 2002, citada por ALVES, 2007).

	<b>Baridade dos agregados cerâmicos (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Baridade dos agregados naturais (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
AG seco em estufa	1158.7	1542.0
AG seco ao ar	1167.3	-
AG saturado	1265.0	-

Vale aqui ressaltar que ROSA (2002) analisou as propriedades de agregados grossos, mas o facto interessante é a percepção de que a origem do material influencia bastante na baridade, pois afeta diretamente a sua densidade.

EVANGELISTA (2007) ensaiou materiais naturais e reciclados, e obteve valores de baridade similares para os agregados naturais grossos, e quanto aos agregados finos, apontou valores menores obtidos para os AFR em relação aos AFN. A Tabela 2.21 mostra os valores obtidos.

Tabela 2.21: *Baridade dos agregados.* (EVANGELISTA, 2007).

	<b>Baridade dos agregados (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
Brita 1 (AN)	1502
Brita 2 (AN)	1487
Brita 3 (AN)	1512
AFN	1517
AFR	1234

BRAVO (2016) obteve também menores valores de baridade para os AFR em relação aos AFN em sua pesquisa, um fato a se apontar é que ele tenha ensaiado agregados finos reciclados de diferentes origens, nomeadamente centrais de gestão de resíduos diferentes. A Tabela 2.22 apresenta os valores obtidos na campanha.

Tabela 2.22: *Baridade dos agregados.*(Adaptado de BRAVO, 2016).

	<b>Baridade dos agregados (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>
Areia fina	1530	40.8
Areia grossa	1540	40.3
Bago de arroz	1410	46.5
AFR Ambilei	1435	32.1
AFR Vimajas	1332	35.6
AFR Europontal	1358	34.2

Um facto a destacar é a apresentação dos índices de vazios, nota-se que neste caso os AFN apresentaram mais vazios entre os grãos que os AFR. Enquanto aos agregados naturais finos apresentaram índice de vazios na ordem dos 40%, os agregados reciclados finos apresentaram esse índice em cerca de 30%.

BRAVO (2016) apresenta como justificativa o fato de os AFR terem a granulometria mais extensa, em comparação aos AFN, o que induz a uma melhor ocupação dos espaços.

A baridade é a forma como partículas se organizam em um determinado espaço segundo RODRIGUES (2011), ele determinou a essa característica de diversas amostras de AFR, sendo uma com origem de resíduos de betões e as outras com origem de misturas de RCD. A tabela 2.23 apresenta os resultados obtidos nos estudos do autor.

Tabela 2.23: *Baridade dos agregados finos reciclados.* (RODRIGUES, 2011).

	<b>Baridade dos agregados (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>
Ambilei - agregados com origem em betões	1354.4	39.1
Ambilei	1441.8	38.4
Arvela	1332.1	39.2
Retria	1255.6	45.0
SGR #1	1383.0	40.4
SGR #2	1285.6	46.0
Trianovo	1305.9	28.9
Valnor	1386.9	41.2
Vimajas #1	1291.5	42.1
Vimajas #2	1320.9	50.5

RODRIGUES (2011) aponta em seu trabalho um desvio padrão de 4.2% da baridade e índice de vazios, afirmando que independentemente da origem, da composição e do tipo de processamento dos RCD, os grãos dos AFR tem a tendência de tomarem a mesma forma, distribuindo-se de forma muito similar quando não há compactação.

Comparando os valores obtidos por ROSA (2002), EVANGELISTA (2007), BRAVO (2016) e RODRIGUES (2011), nota-se que os AFR possuem baridade significativamente menor que os AFN, e possuem também valores razoavelmente parecidos, apesar de obtidos em épocas diferentes e por pesquisadores diferentes, em todos os trabalhos. É provável que os valores mais baixos para baridade dos AFR em comparação aos AFN devem se à homogeneidade particular dos agregados reciclados, que podem conter materiais tipicamente mais leves misturados com as areias, à maior porosidade dos grãos, e à granulometria mais extensa em relação aos AFN.

Segundo LEITE (2001), na produção de betões com agregados naturais a taxa de absorção não exerce muita influência, pois estes possuem pouquíssima porosidade. Pelo fato de agregados reciclados possuírem uma taxa de porosidade bem maior, também apresentam uma taxa de absorção maior, que se torna significativa na produção de betões.

Segundo BARRA (1996), citado por LEITE (2001) a quantidade de água absorvida por um agregado reciclado depende de determinados fatores, nomeadamente a humidade inicial do material, o tempo que o agregado fica em contacto com a água, se o material entra em contacto diretamente com a pasta de cimento ou com a água, entre outros fatores.

Segundo ANGULO (2005) citado por RODRIGUES e FUCALÉ (2014), betões produzidos com agregados reciclados apresentam perda de trabalhabilidade, além de ser necessário mais cimento em sua amassadura devido à alta absorção de água que apresentam o material reciclado.

EVANGELISTA e BRITO (2010) apresentam a ideia que os AFR possuem menor massa específica que o agregado fino natural, pois possuem maior porosidade, o que causa um aumento de cerca de 80% na taxa de absorção de água dos betões. Os autores estudaram o comportamento do betão produzido com agregados reciclados e afirmam que estes apresentam maior índice de vazios e maior absorção de água, em relação ao betão feito da maneira mais convencional. Esses fenômenos ocorrem devido à maior relação água/cimento, à redução da massa específica e à maior permeabilidade.

MEHTA e MONTEIRO (2008), apontam a porosidade como uma das propriedade que afetam de maneira significativa o módulo de elasticidade do betão, pois a porosidade do agregado determina a sua rigidez e conseqüentemente a capacidade de resistir à deformação do conjunto. Portanto é possível perceber que a substituição de agregados finos convencionais por AFR causam ao betão uma variação de suas propriedades,

nomeadamente a porosidade e a sua permeabilidade. A alteração dessas características causam uma redução do módulo de elasticidade.

A absorção de água pelo agregado é determinada pelo quociente, em percentagem, entre a diminuição de massa de uma amostra constituída por agregados saturados de água com superfície seca e a massa da amostra seca (ALVES, 2007).

PEDROZO (2008) afirma que a absorção de água dos agregados reciclados é um fator importante no estudo do seu uso em betões, já que esta taxa interfere na relação a/c da mistura, além de influenciar na trabalhabilidade do material, podendo deixar o betão muito seco.

De acordo com TAM *et al.* (2006) citado por PEDROZO (2008) o agregado reciclado apresenta maior absorção de água que o agregado natural, apresentando se entre 3 e 10% para o reciclado e menos de 1 até 5% para os naturais. A Tabela 2.24 apresenta uma comparação de vários tipos de agregados (miúdo natural, miúdo reciclado e graúdo natural) e algumas propriedades, nomeadamente absorção de água, massa específica real e teor de material pulverulento.

Tabela 2.24: *Comparação de propriedades de diferentes tipos de agregados.* (Adaptado de RODRIGUES e FUCALE, 2014).

<b>Agregado</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Massa específica real (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Teor de mat. pulverulento (%)</b>
Fino natural	1.00	2620.0	1.0
Fino reciclado	10.00	2540.0	8.7
Grosso natural	0.33	2700.0	0.4

Na Tabela 2.24 é possível identificar que os valores de absorção de água e quantidade de material pulverulento é muito maior no material reciclado quando comparado ao material natural. Também é possível notar um ligeira variação da massa específica do agregado fino. Durante a pesquisa de caracterização dos agregados reciclados produtos de resíduo, RODRIGUES E FUCALE (2014) verificaram que os AFR apresentam absorção cerca de 10 vezes maior que os agregados finos naturais após 24h de imersão como pode ser verificado na Tabela 2.24. E, sendo assim, a massa

específica desse material é menor, sendo inversamente proporcional à sua capacidade de absorção de água.

Em relação à absorção de água, LEVY (2001) citado por RODRIGUES e FUCALE (2014), encontrou valores até 60% maiores que Rodrigues e Fucale. BUTTLER (2013) encontrou taxas aproximadamente 50% maiores para agregados grossos reciclados. KATHIB (2005), citado por PEDROZO (2008) encontrou o valor da absorção de 6.2% para agregados cerâmicos e 14,8% para agregados originários de betão.

MANSUR et al (1999) e TOPÇU e GÜNÇAN (1995), citados por LEITE (2001), encontraram valores semelhante de absorção de água, 6.10% para os primeiros, e 7.0% para os segundos. LEITE (2001) ainda cita BAZUCO (1999) que ensaiou agregados reciclados com origem em betões, e obteve em 24 horas a taxa de absorção de 8.45%, e observou ainda que os agregados reciclados absorvem toda a água possível em aproximadamente 30 minutos.

Segundo LIMA (1999), citado por LEITE (2001) agregados submersos atingem 95% da capacidade de absorção máxima após 5 minutos, independente da composição dos agregados reciclados. A autora ainda cita que MAULTZSCH e MELLMANN concluíram que após 10 minutos de imersão, agregados atingem 70 a 90% da capacidade de absorção.

KNIGHTS (1998) citado por LEITE (2001) afirma que apenas parte da água calculada pela taxa de absorção era absorvida em pré-saturação dos agregados para se produzir betões. Dessa forma sugere que apenas deve se compensar a absorção relativa a 10 minutos de imersão em água, tempo considerado adequado para amenizar a alta absorção de água dos agregados reciclados.

DEVENNY e KHALAF (199), citados por LEITE (2001) apresentaram taxas de absorção de agregados reciclados com origem em tijolos cerâmicos com variações entre 5 e 15% em relação à massa do material seco. Os autores recomendam a submersão dos agregados 30 minutos antes da produção do betão como maneira de compensar a absorção de água dos AFR.

LEITE (2001) cita BARRA (1996) que encontrou as seguintes taxas de absorção de água representadas na Tabela 2.25.

Tabela 2.25: *Taxas de absorção de agregados reciclados em função do tipo de origem e granulometria.* (BARRA, 1996, obtido de LEITE, 2001).

<b>Origem do RCD</b>	<b>Frações</b>	<b>Taxa de absorção (%)</b>
Betão	12 - 20 mm	6.85
	6 - 12 mm	7.49
Material cerâmico	12 - 20 mm	14.5
	6 - 12 mm	14.4

Na Tabela 2.25 é possível notar que a taxa de absorção varia de acordo com a granulometria do agregado, isso acontece pois a porosidade do material também varia de acordo com o tamanho das partículas. LEITE (2001) ainda cita os valores encontrados por DESSY et al. (1998), que apresentam variações das taxas de absorção conforme também variam a granulometria. Os resultados dessa pesquisa são apresentados na Tabela 2.26.

Tabela 2.26: *Taxas de absorção de agregados reciclados em função da granulometria.* (DESSY et al, 1998, obtido de LEITE, 2001).

<b>Frações</b>	<b>Taxa de absorção (%)</b>
0 - 4 mm	8.15
4 - 7 mm	5.43
4 - 16 mm	4.68

LEITE (2001) indica que nas menores frações dos agregados estão presentes partículas de cimento, o que explica o aumento da taxas de absorção observadas na Tabela ????. A Tabela 2.27 a seguir apresenta os resultados obtidos por RODRIGUES (2011) para absorção de água de agregados provenientes de centrais de reciclagem em Portugal. A Figura 2.16 mostra as taxas de absorção de água referente à Tabela 2.27 em funções das centrais de reciclagem.

Tabela 2.27: Taxas de absorção de agregados reciclados em função da central de reciclagem. (RODRIGUES, 2011).

Amostra	Taxa de absorção (%)
Ambilei - agregados com origem em betões	7.1
Ambilei - agregados com origem em RCD	4.1
Arvela - agregados com origem em RCD	7.3
Retria - agregados com origem em RCD	4.7
SGR #1 - agregados com origem em RCD	4.9
SGR #2 - agregados com origem em RCD	4.0
Trianovo - agregados com origem em RCD	8.3
Valnor - agregados com origem em RCD	4.5
Vimajas #1 - agregados com origem em RCD	6.6
Vimajas #2 - agregados com origem em RCD	5.5

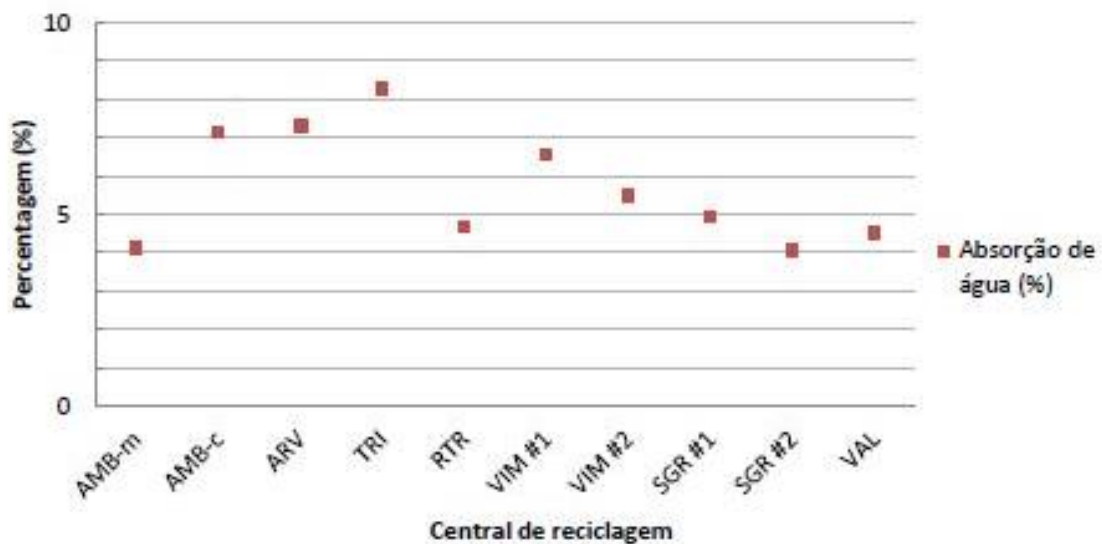


Figura 2.16 – Absorção de água em função do AFR da central de reciclagem. (RODRIGUES, 2011).

Segundo RODRIGUES (2011), a porosidade é maior em agregados finos reciclados, pois nesses materiais existem argamassas junto aos grãos, e também existe na composição partículas provenientes de materiais cerâmicos. Isso faz com que esses resíduos possuam maior taxa de absorção. O autor compara ainda o seu trabalho com o de outros autores e afirma que os AFR possuem taxas de absorção maiores que os agregados finos naturais, e que essa taxa varia cerca de 25%. As Tabelas 2.28 e 2.29

indicam as taxas de absorção obtidas por BRAVO (2016) para agregados naturais e reciclados.

Tabela 2.28: *Taxas de absorção de agregados naturais.* (BRAVO, 2016).

	Areia Fina	Areia Grossa	Bago de Arroz	Brita 1	Brita 2
Absorção de água (%)	0.3	0.7	1.0	1.3	1.5

Tabela 2.29: *Taxas de absorção de agregados reciclados.* (BRAVO, 2016).

	AFR Ambilei	AFR Vimajas	AFR Europtal
Absorção de água (%)	0.3	0.7	1.0

Segundo EVANGELISTA (2007), os agregados finos naturais possuem geralmente taxas de absorção de água inferior a 1%, valor em comparação aos apresentados dos AFR bem menor. RODRIGUES (2011) ainda frisa a importância de fazer o acerto de água necessário às amassaduras de betão que utilizam AFR na composição levando em consideração a taxa de absorção bem mais elevada. GONÇALVES (2007), citado por RODRIGUES (2011) afirma que a absorção de água máxima para que os agregados reciclados sejam utilizados no fabrico de betão é de 7%. E ao comparar esse valor com os obtidos em sua pesquisa, aponta que dentro desse critério, as amostras acima desse valor estariam em descumprimento da conformidade, embora indique que EVANGELISTA (2007) tenha utilizado AFR com taxas de absorção acima de 13%, e considerou o comportamento desses betões como aceitável.

LEITE (2001) afirma que quando se deseja produzir betões com agregados reciclados existe a necessidade de se acrescentar mais água à mistura, se comparado à quantidade necessária a betões feitos com agregados naturais, pois parte dessa água será absorvida devido às taxas de absorção mais altas desses materiais. Dependendo da quantidade de água necessária a ser acrescida, haverá um aumento da relação a/c, que acarreta na necessidade de se acrescentar cimento, elevando o custo de produção do betão. A autora afirma que compensar parcialmente a absorção dos agregados

reciclados é uma boa maneira de se controlar a trabalhabilidade do betão no estado fresco.

Pode-se concluir que os agregados reciclados são em geral mais porosos que os naturais, dessa forma ele têm maior capacidade de absorção de água. O uso desses materiais na produção de betão faz com que a mistura fique mais seca, sendo necessário fazer uma compensação na quantidade de água, alterando a relação a/c.

### **2.1.3. Massa volúmica**

Massa volúmica de um corpo é a relação entre a sua massa e o seu volume. No caso de agregados, o conceito aplica-se a cada partícula e não ao conjunto dos agregados. Em Portugal é comum o uso do traço volumétrico para dimensionar betões, por esse motivo o conhecimento desta propriedade dos agregados é de extrema importância.

Segundo PEDROZO (2008) a massa específica de um agregado reciclado é usualmente menor que a dos agregados naturais, devido à argamassa que possui uma massa específica mais baixa, que adere à partículas desse agregado. O autor cita que BAZUCO (1999) afirma que a massa específica dos agregados reciclados são cerca de 5 a 10% mais baixas que as dos agregados naturais.

MEHTA e MONTEIRO (2008) informam que a massa específica do betão fresco depende da porosidade, da massa específica do agregado, e do seu formato e dimensão.

BUTTLER (2003) afirma que essa característica têm menor influência em betões com agregados reciclados, devido ao formato, dimensões e porosidade do material, que pode acarretar na redução da massa específica do betão, devido ao aumento da relação água/cimento.

Segundo LEITE (2001), variações nos valores de massas específicas entre agregados finos naturais e AFR geram alterações na dosagem de betão e argamassa, existindo assim a necessidade de realizar uma compensação na percentagem de substituição de agregados finos a ser utilizadas nas misturas de betão. Ainda segundo a autora, se esse procedimento não for adotado, como o volume do AFR é maior em relação à mesma massa do agregado natural, o resultado é uma distorção entre volumes de betão convencional e reciclado produzidos com o mesmo traço.

Segundo BRAVO (2016), investigações sobre a massa volúmica de agregados reciclados utilizam a densidade encontrada como um indicador de sua qualidade, quanto maior for a densidade, melhor a qualidade dos betões produzidos com esses materiais, segundo essas pesquisas. Ainda segundo o autor, a densidade depende fatores como a quantidade de paste de cimento presente nesse agregado.

Segundo ALVES (2007), nos ensaios realizados por ROSA (2002), o agregado cerâmico apresentou um valor alto, de 12% para absorção de água, se comparado com a taxa do agregado natural, nomeadamente 1%. Para a massa volúmica, obteve-se valores inferiores ao dos agregados naturais.

EVANGELISTA (2007), encontrou valores de massa volúmica para os agregados finos naturais, que classificou como baixos se comparados ao agregado naturais tradicionais. Os valores baixos justificam-se, segundo o autor pela alta porosidade que é particular ao agregado reciclado.

Segundo BRAVO (2016), VIEIRA (2013) estudou pesquisas desenvolvidas sobre agregados reciclados de origem em materiais cerâmicos, e chegou à conclusão que esses materiais possuem menor massa volúmica que os AN, devido à maior porosidade desse material. O autor indica que a massa volúmica seca dos agregados reciclados de origem em tijolos possuem valores entre 1750 e 2496 kg/m<sup>3</sup>, e os que possuem a origem em cerâmicos de louça sanitária, possuem massa volúmica seca entre 2310 e 2780 kg/m<sup>3</sup>.

BRAVO (2016) cita que SILVA et al. (2014) desenvolveram uma pesquisa que analisou características de AR provenientes de RCD de 236 trabalhos previamente realizado por outros autores, entre os anos de 1977 e 2014. A Figura 2.17 a seguir mostra os resultados obtidos nessa compilação de dados.

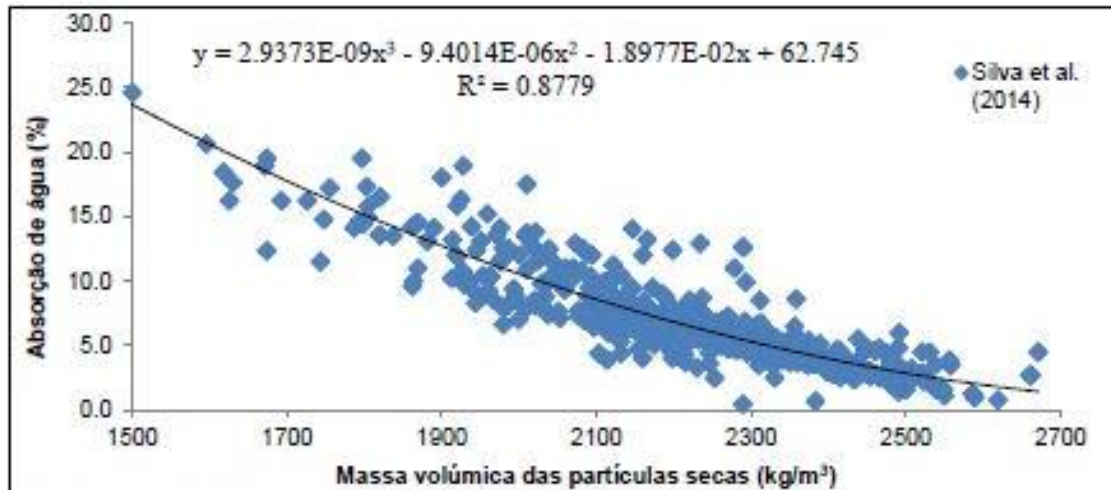


Figura 2.17 - Relação entre a massa volúmica e a absorção de água dos AR. (SILVA et al., 2014, adaptado por BRAVO, 2016).

BRAVO (2016) aponta que na investigação por ele citada, foi encontrado valores médios de massa volúmica para AFR de 2132.1 kg/m<sup>3</sup>, e 8.7% de taxa de absorção de água. Ainda assinala que de acordo com o aumento da massa volúmica das partícula, diminui a taxa de absorção. Na Tabela 2.30 são apresentadas as massa volúmicas de agregados naturais obtidas por BRAVO (2016). Na Tabela 2.31 estão apresentados as massas volúmicas de AFR de três centrais e reciclagem distintas.

Tabela 2.30: Massas volúmicas de AN. Adaptado de (BRAVO, 2016).

	Areia Fina	Areia Grossa	Bago de Arroz	Brita 1	Brita 2
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m <sup>3</sup> )	2603.9	2626.3	2708.0	2697.4	2704.5
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m <sup>3</sup> )	2583.2	2581.4	2634.0	2609.3	2599.4
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m <sup>3</sup> )	2591.2	2598.5	2661.0	2641.9	2638.3

Tabela 2.31: *Massas volúmicas de AFR. Adaptado de (BRAVO, 2016).*

	AFR Ambilei	AFR Vimajas	AFR Europortal
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m <sup>3</sup> )	2603.9	2626.3	2708.0
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m <sup>3</sup> )	2583.2	2581.4	2634.0
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m <sup>3</sup> )	2591.2	2598.5	2661.0

Segundo BRAVO (2016), esses dados mostram que os AR sempre vão necessitar de uma maior quantidade de água até a saturação que os AN. O autor ainda justifica a diferença entre valores obtidos devido à distinta composição dos materiais.

A Tabela 2.32 a seguir mostra os resultados obtidos por ROSA (2002) citada por ALVES (2007), em relação à massas volúmicas de AFR.

Tabela 2.32: *Massas volúmicas de AFR. (ALVES, 2007, adaptado de ROSA, 2002).*

Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m <sup>3</sup> )	2682.71
Massa volúmica das partículas saturadas (kg/m <sup>3</sup> )	2272.81
Massa volúmica das partículas secas (kg/m <sup>3</sup> )	2029.21

EVANGELISTA (2007) obteve as massas volúmicas referidas na Tabela 2.33 a seguir.

Tabela 2.33: *Massas volúmicas de AFR.* (Adaptado de EVANGELISTA, 2007).

	Massa volúmica do material impermeável (kg/m <sup>3</sup> )	Massa volúmica das partículas secas (kg/m <sup>3</sup> )	Massa volúmica das partículas saturadas (kg/m <sup>3</sup> )
AFN	2597	2544	2564
AFR	2555	1913	2165

EVANGELISTA (2007) aponta que os AFR apresentam pior desempenho, nomeadamente uma massa volúmica menor, que os AN devido à alta porosidade.

A tabela 2.34 a seguir apresenta os resultados obtidos na pesquisa de RODRIGUES (2011) em relação a massas volúmicas de AFR provenientes de centrais de reciclagem distintas, e a Figura 2.18 compara as massas volúmicas apresentadas anteriormente.

Tabela 2.34: *Massas volúmicas e absorção de água.* (Adaptado de RODRIGUES, 2011).

Amostra	Massa volúmica das partículas impermeáveis (kg/m <sup>3</sup> )	Massa volúmica seca (kg/m <sup>3</sup> )	Massa volúmica saturada com superfície seca (kg/m <sup>3</sup> )
Ambilei – agregados com origem em betão	2684.8	2225.2	2396.4
Ambilei	2601.2	2340.5	2440.7
Arvela	2645.6	2190.9	2362.8
Retria	2572.7	2284.2	2396.3
SGR #1	2637.6	2320.8	2440.9
SGR #2	2647.1	2382.1	2482.2
Trianovo	2649.0	2138.2	2331.0
Valnor	2653.2	2357.6	2469.0
Vimajas #1	2644.0	2230.0	2386.6
Vimajas #2	2719.0	2348.8	2485.0

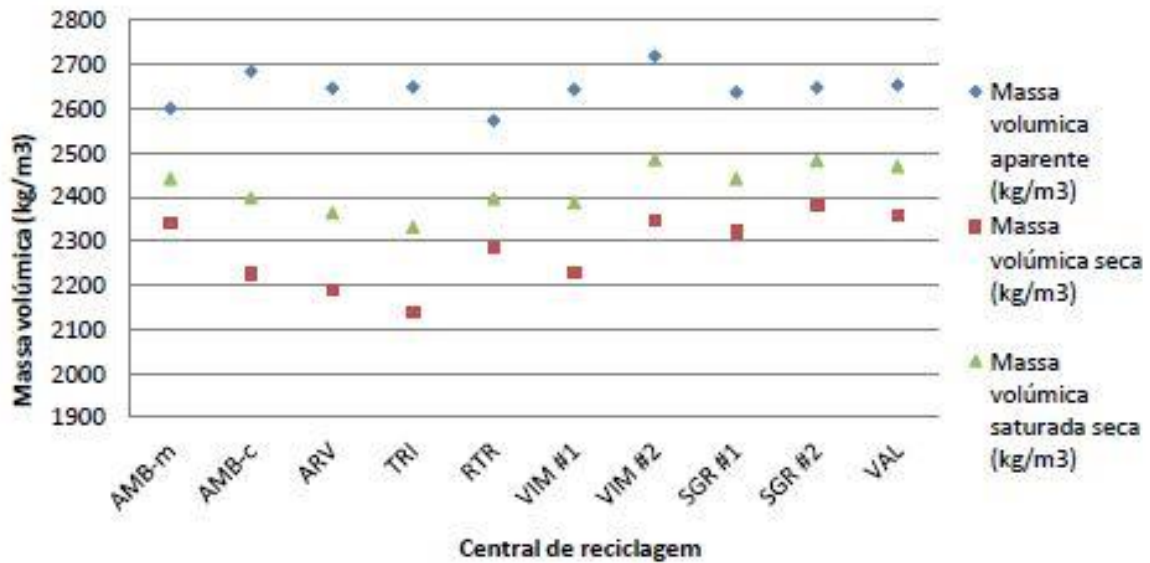


Figura 2.18 - Massa volúmica de diferentes centrais. (RODRIGUES, 2011).

RODRIGUES (2011) observa que a massa volúmica foi sempre maior que 2000 Kg/m<sup>3</sup>, dessa forma esses AFR podem ser classificados como agregados de massa normal segundo a Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto. O autor afirma que a determinação da massa volúmica saturada de superfície seca é importante para a produção de betões pois os agregados estão habitualmente húmidos, entre os estados seco e saturado, Então, deve-se considerar a massa volúmica seca relacionada com a percentagem de humidade para estabelecer a quantidade de água necessária na mistura. O autor ainda aponta que quanto maior for a diferença entre a massa volúmica seca e massa volúmica saturada, maior é a porosidade do material.

Pode-se concluir que agregados reciclados usualmente possuem uma massa volúmica mais baixa que os agregados naturais, principalmente à natureza do material e à sua maior porosidade. Essa característica influencia na massa específica do betão, fazendo com que ele fique mais leve.

#### 2.1.4. Textura superficial e forma dos grãos

NEVILLE (1997) citado por PEDROZO (2008) afirma que a forma dos grãos dos agregados exerce grande influência na produção do betão, especialmente sobre a trabalhabilidade, compacidade, ângulo de atrito interno, e quantidade de água necessária para a mistura. Ainda segundo o autor, depois de britados, os agregados apresentam uma relação superfície/volume maior que a dos agregados naturais, sendo necessário maior consumo de cimento na mistura para melhorar a trabalhabilidade. Segundo COUTINHO (1997), citado por LEITE (2001) a forma dos grãos dos agregados

influencia bastante na produção de betões, especialmente sobre aspectos como a trabalhabilidade, compacidade, ângulo de atrito interno e quantidade de água que será necessária na amassadura. LEITE (2011) afirma que normalmente os AR possuem superfície mais rugosa e porosa que as dos AN.

A porosidade elevada dos agregados reciclados pode principalmente ser atribuída ao resíduo de argamassa que adere ao agregado original. Isto, de fato afeta também a trabalhabilidade e outras propriedades da mistura de argamassa de betão (PEDROZO, 2008). Outro fator que pode influenciar na textura e forma dos grãos de agregado reciclado segundo ZORDAN (1997) citado por PEDROZO (2008) é o tipo e o nível de britagem utilizada.

Segundo LIMA (2000), citado por LEITE (2001) deve se ter atenção quanto ao teor de partículas lamelares nas amostras de AR. Segundo LEITE (2001), essas partículas quando presentes nas misturas de betão deixam a argamassa mais coesas e conseqüentemente pioram a trabalhabilidade, sendo necessário maior quantidade de pasta de cimento.

## **2.2. Propriedades dos betões com agregados finos reciclados no estado endurecido**

### **2.2.1. Resistência à compressão**

MEHTA e MONTEIRO (1994) citados por PEDROZO (2008), definem a resistência à compressão como a capacidade que o betão tem de resistir à determinada carga sem se romper. O desempenho de um betão depende diretamente do desempenho dos materiais utilizados para a sua confecção. Os agregados, como elemento fundamental, possuem influência nas propriedades dos betões no estado fresco e endurecido (PEDROZO, 2008).

Segundo BAZUCO (1999) citado por LEITE (2001), ao se estudar a resistência a compressão, as características dos AR presentes nas misturas, as percentagens de substituição e os níveis de resistência devem ser considerados.

Segundo KHATIB (2005) citado por PEDROZO (2008), há uma redução na resistência à compressão quando o agregado fino natural é substituído por AFR, e esta redução pode alcançar até 30% quando a percentagem de substituição é 100%. Ainda segundo

o autor uma percentagem de substituição de 25% acarreta numa redução da resistência em 15%. Ainda a substituição do agregado natural por agregado fino originado de resíduos de tijolos não causa redução significativa nos valores de resistência à compressão em idades avançadas, mesmo para teores mais altos, sendo que para substituições até 50% obteve valores similares aos de referência; e para 100%, houve uma redução menor que 10%.

Na Figura 2.19 podem ser observados os resultados dos ensaios de resistência à compressão com diferentes teores de substituição.

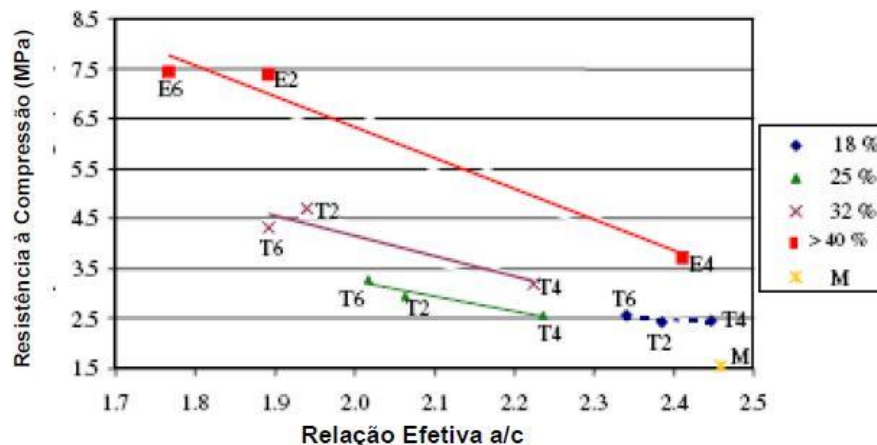


Figura 2.19 - Resultados de resistência à compressão (MIRANDA e SELMO, 2006 obtido de PEDROZO, 2008)

Segundo as observações de PEDROZO (2008), que citou o estudo, MIRANDA e SELMO (2006) concluíram que para uma mesma percentagem de substituição de agregados finos, uma variação de  $\pm 0.12$  na relação a/c não acarretou em variação significativa na resistência à compressão, sem considerar a composição dos resíduos.

Quanto ao comportamento em relação à compressão, RODRIGUES e FUCALÉ (2014) não consideraram significativas as variações, apontando que o betão obteve um desempenho superior em alguns cenários. Na pesquisa foi apurado que para a amostra estudada, o teor de 50% de substituição de agregados finos reciclados foi o mais adequado.

A Tabela 2.35 mostra os resultados do ensaio a compressão para os provetes com diferentes porcentagens de substituição de agregados finos reciclados, e diferentes traços obtidos por RODRIGUES E FUCALÉ (2014).

Tabela 2.35: *Resultados do ensaio de resistência à compressão.* (Adaptado de RODRIGUES e FUCALE, 2014).

Idade (dias)	Teor de substituição	Resistência à compressão fck (MPa)		
		1:3,5	1:5,0	1:6,5
3	Referência	22.2	12.7	8.3
	50% AFR	18.9	13.2	7.4
	100% AFR	18	10.3	6.6
7	Referência	24.9	17.9	10.6
	50% AFR	22.2	16.5	9.9
	100% AFR	20.1	14.4	9.5
28	Referência	31.9	21.9	10.7
	50% AFR	31	22.7	14.3
	100% AFR	27.9	20.9	12.8
91	Referência	40	27.7	19.7
	50% AFR	40	29.7	18.4
	100% AFR	35.75	26.2	18

Pode-se aferir a partir das pesquisas apresentadas neste trabalho que os diferentes valores encontrados devem-se à composições diferentes do resíduos de construção e demolição, assim como dos agregados reciclados, e também dos traços da mistura do betão utilizados, nota se que conforme aumenta a relação a/c, diminui o desempenho.

RODRIGUES e FUCALE (2014) verificaram em relação ao comportamento mecânico do betão produzido com AFR reduções na resistência à compressão, e também queda no módulo de elasticidade.

PEDROZO (2008) também analisou provetes de betão produzidos com AFR submetidos à compressão axial e obteve os seguintes resultados para diferentes idades: 7, 28 e 90 dias, apresentados na Tabela 2.36, na Figura 2.20, na Figura 2.21 e na Figura 2.22:

Tabela 2.36: *Composição dos betões com diferentes dosagens de AFR.* (PEDROZO, 2008).

Dosagem		Traço Unitário, em massa - Seca - RCD FINO*
0%		1 : 2,36 : 0,00 : 1,81 : 0,60
AFR1 (M1)	25%	1 : 1,77 : 0,56 : 1,81 : 0,60
AFR2 (M2)	50%	1 : 1,18 : 1,12 : 1,81 : 0,60
	75%	1 : 0,59 : 1,69 : 1,81 : 0,60
AFR3 (M3)	100%	1 : 0,00 : 2,25 : 1,81 : 0,60

\*Traço unitário = cimento : areia natural : areia RCD : brita natural : água

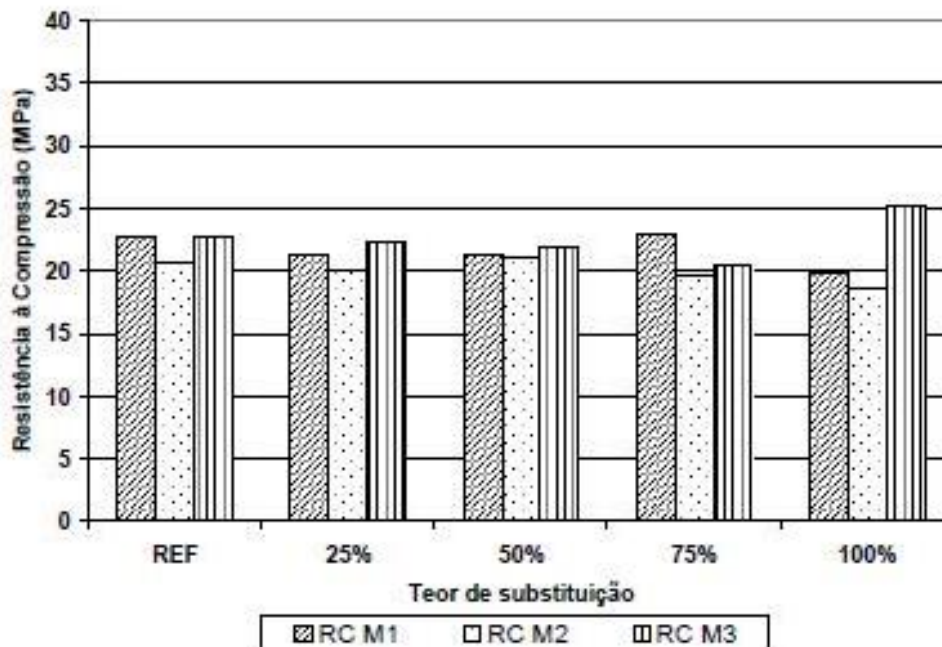


Figura 2.20- Resistência à compressão dos betões para três amostras, com diferentes taxas de substituição para agregado fino reciclado aos 7 dias (PEDROZO, 2008)

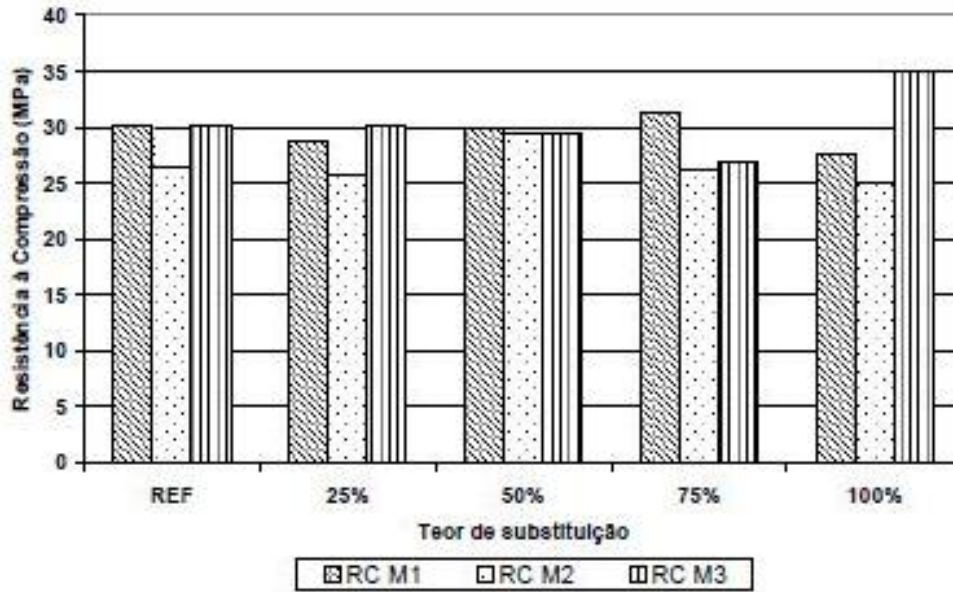


Figura 2.21- Resistência à compressão dos betões para três amostras, com diferentes taxas de substituição para agregado fino reciclado aos 28 dias (PEDROZO, 2008)

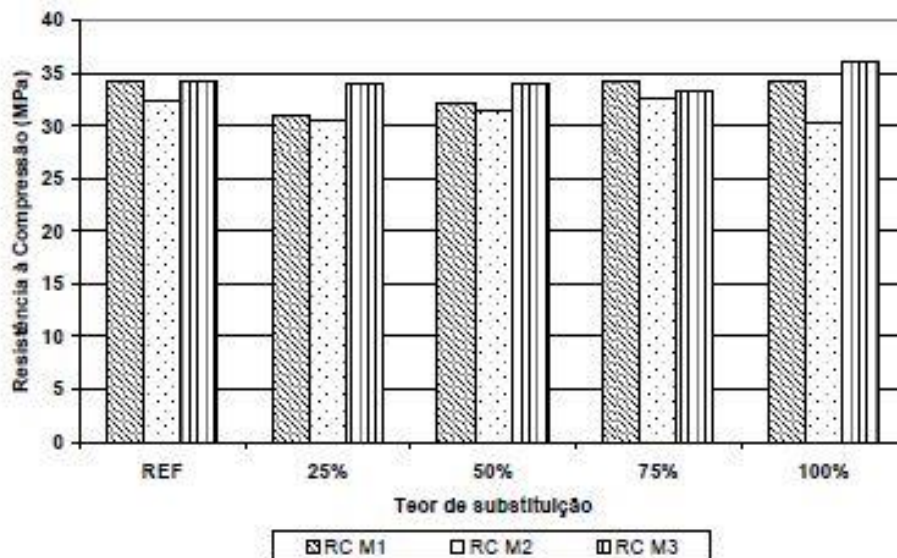


Figura 2.22- Resistência à compressão dos betões para três amostras, com diferentes taxas de substituição para agregado fino reciclado aos 91 dias (PEDROZO, 2008)

Segundo PEDROZO (2008), ao avaliar os resultados percebeu-se que não houve variações importantes na resistência à compressão dos betões com a substituição de agregados naturais finos por AFR. Em idades mais avançadas a diferença se

comparado com os resultados do betão de referência, diminui. PEDROZO (2008) concluiu que o bom desempenho do betão produzido com AFR ocorre devido à maior quantidade de cimento nas misturas, o que acarreta resistências maiores.

Segundo LEITE (2001), betões produzidos com AFR em sua composição têm maior influência em sua resistência à compressão, ela cita os estudo de WAINWRIGHT et al. (1993) que obtiveram resultados que mostram que betões produzidos com AFR e AGR apresentaram maiores reduções nessa propriedade dos que os apenas produzidos com AGR.

Ainda segundo LEITE (2001), TOPÇU e GÜNÇAN (1995) encontraram reduções de até 80% de valore de resistência à compressão para betões com substituição de AR em percentagens de 0, 30, 50, 70 e 100%. Quanto maior era a quantidade de AR, mais baixo era o desempenho.

Ainda segundo a autora, SAGOE-CRENTSIL et al. (1998) encontraram valores de resistência à compressão 32% inferiores para betões produzidos com 100% de substituição de AFR, em relação à amassadura de referência. Os resultados foram atribuídos à maior necessidade de água que esse tipo de betão apresenta. LEITE (2001) ainda observa que deve se atentar para a trabalhabilidade das misturas, para que não se torne difícil o adensamento, resultando em perda de desempenho.

Ao analisar os resultados encontrados por outros autores, não foi possível identificar um padrão no comportamento dos betões produzidos com AFR. O fato de não existir uma metodologia padrão para a determinação das composições dos betões torna mais difícil uma análise comparativa dos resultados.

### **2.2.2. Resistência à tração**

LEITE (2001) afirma que é normal que a resistência à tração dos betões seja vista como uma característica menos importante, tendo em vista que o betão reconhecidamente não é um material para resistir à esforços de tração. Segundo BRAVO (2016) embora a resistência à tração seja pouco importante no comportamento de sistemas estruturais aos Estados Limites Últimos, ela é de suma importância aos Estados Limites de Utilização.

Segundo LEITE (2001), BAZUCO (1999) obteve reduções na resistência à tração entre 10 e 20% ao substituir AN por AFR nas misturas de betão.

EVANGELISTA (2007), obteve resultados de resistência à tração que variaram linearmente de acordo com o aumento da quantidade de AFR nas misturas, sofrendo uma redução de aproximadamente 23% para uma taxa de substituição de 100%.

EVANGELISTA E BRITO (2014) segundo BRAVO (2016) verificou que a presença de AFR faz com que os betões apresentem um redução de desempenho quanto à tração. O autor encontrou valores de redução de 3.3 e 2.5 MPa para 7 dias de idade, 3.4 e 2.8 MPa para 28 dias de idade, e 3.7 e 2.9 MPa para 120 dias de idade.

BRAVO (2016) obteve valores que indicam reduções na resistência à tração conforme aumenta se a percentagem de substituição dos AFR. Os valores obtidos pelo autor estão indicados na Tabela 2.37.

Tabela 2.37: *Varição da resistência à tração com diferentes taxas de substituição de AFR.* (Adaptado de BRAVO, 2008)

	Percentagem de substituição dos agregados								
	0	10		25		50		100	
	fct,sp (MPa)	fct,sp (MPa)	Δ (%)	fct,sp (MPa)	Δ (%)	fct,sp (MPa)	Δ (%)	fct,sp (MPa)	Δ (%)
AR finos Ambilei	4.0	3.4 ± 0.1	-14.9	3.5 ± 0.2	-12.4	3.4 ± 0.3	-14.6	3.2 ± 0.1	-20.7
AR finos Europortal		3.9 ± 0.2	-2.8	3.7 ± 0,2	-8.9	3.4 ± 0.5	-16.3	2.6 ± 0.1	-34.4
AR finos Vimajas		4.0 ± 0.4	-0.4	3.4 ± 0.1	-15.8	3.2 ± 0.3	-20.6	2.7 ± 0.2	-32.1

BRAVO (2016) também indica que a composição do agregados reciclados é determinante para os resultados. Os agregados das duas primeiras centrais, Ambilei e Europortal possuíam em suas composições uma maior quantidade de argila, o que fez com que houvesse a necessidade da adição de mais água na mistura dos betões.

Segundo BRAVO (2016), MERLET e PIMIENTA (1994) encontraram valores que indicam a redução de resistência à tração para 100% de substituição de AFR de 22% se comparados a betões convencionais. Ainda segundo o autor, SOLYMAN (2005) encontrou uma diminuição de 24% para substituição de 70% de AN por AFR em sua pesquisa.

LEITE (2001) estudo a resistência à tração de betões com diferentes relações a/c, entre 0.4 e 0.8. Foi verificado que quando o betão foi produzido com relação a/c de 0.4, e 100% de substituição dos agregados houve uma redução dos valores de resistência

obtidos de 19 %. Para betões com substituição integral de agregados com relação de 0.60, 0.75, 0.80, houveram aumentos de 7%, 21%, e 25% respectivamente. Então a autora conclui que quanto maior a relação a/c da mistura, melhor o desempenho do betão.

LEITE (2001) apresenta a hipótese que a resistência à tração é influenciada por mecanismos de aderência física entre partículas, então é correto pensar que a aderência entre o betão e a superfície dos agregados acontece de maneira mais fácil quando os materiais da mistura são mais irregulares e mais rugosos, pois há um aumento da área da superfície e um maior entrelaçamento dos compostos de hidratação com os poros dos agregados. Dessa forma seria de se esperar um melhor comportamento dos betões produzidos com AFR. BRAVO (2016) cita BRITO et al (2005), que afirmam que a superfície irregular dos agregados reciclados proporcionam aumento à resistência à tração dos betões produzidos com esses materiais, entretanto, a argamassa aderida, a origem dos compostos de AR e a necessidade do aumento da relação a/c interferem de forma negativa esta propriedade.

## 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 3.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é abordar o planeamento e a execução da campanha experimental, descrevendo os ensaios e os procedimentos adotados durante a pesquisa. Procurou-se descrever de forma resumida os métodos e procedimentos realizados para determinar as características dos RCD e também dos betões produzidos.

Primeiramente procurou-se determinar as características dos AFR provenientes do RCD. Foram utilizados procedimentos normativos, sempre que possível homologados pelo IPQ. Apresenta-se a seguir a lista de características dos AFR, que são indispensáveis para calcular as quantidades dos matérias para realizar as amassaduras:

- granulometria;
- baridade;
- massa volúmica;
- absorção de água.

Além das propriedades citadas também foram determinados o teor de finos e o volume de vazios dos AFR.

Em segundo lugar, procurou-se entender qual a quantidade de provetes necessários para obter se a informação referente às características do betão produzidos com AFR e com a água de lavagem desses resíduos, nomeadamente a resistência à compressão e resistência à tração. A Tabela 3.1 apresenta a quantidade de provetes necessários de cada família por tipo de ensaio:

Tabela 3.1: Quantidade de provetes necessários à pesquisa.

Ensaio	Família	Variações	Idade do betão			Total
			7 dias	28 dias	90 dias	
Resistência à compressão axial	1	4	3	3	3	36
	2	3	3	3	3	27
	3	4	3	3	3	36
Resistência à tração por compressão diametral	1	4	2	3	2	28
	2	3	2	3	2	21
	3	4	2	3	2	28
					Total geral	176

Os provetes utilizados no ensaio para determinar a resistência à compressão axial são cubos de 15 x 15 cm, e os produzidos para o ensaio de compressão diametral são cilindros de 30 cm de altura e de 15 cm de diâmetro.

A Figura 3.1 mostra provetes produzidos durante a campanha experimental.



Figura 3.1- Provetes - betão de referência.

### **3.2. Materiais utilizados**

Os materiais utilizados têm influência significativa nas características dos betões produzidos, com esse entendimento pretende-se manter a coerência, utilizando os mesmos materiais ao longo da campanha experimental na produção de todas as famílias de betões. Seguir-se-á também as normas técnicas de forma que o trabalho tenha a credibilidade necessária, e comparar os resultados com outras pesquisas de referência. Há de se ressaltar que toda a água utilizada no trabalho será proveniente da rede pública.

Os agregados naturais, finos e grossos utilizados na campanha foram fornecidos pelo laboratório de materiais do ISEL. Os agregados possuem certificação com marcação CE, respeitando a norma NP EN 12620 (2010). Foram utilizados dois tipos de areia: 0/2 e 0/4. Também foram utilizados dois tipos de brita: brita 1 e brita 2.

O cimento utilizado foi o CEM I 42.5 R, fornecido pela Secil. As características dos materiais usados nas composições das misturas estão apresentados no Anexo A deste trabalho.

A central de reciclagem que forneceu os RCD, de modo a obter-se posteriormente os agregados reciclados foi escolhida de acordo com o critério geográfico, de modo a possuir características compatíveis com padrões de construção de Lisboa, e também a facilitar a recolha do material. A central escolhida foi a SGR – Sociedade Gestora de Resíduos, que localiza-se no Seixal. A SGR é uma empresa de gestão de resíduos, que promove a triagem, reciclagem, valorização energética e reutilização de resíduos, e tem implementado um Sistema de Controlo de Produção em fábrica dos seus Agregados Inertes Reciclados, de acordo com a norma NP EN 13242 “Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária”.

### **3.3. Lavagem dos AFR**

Segundo LEITE (2001) a origem do RCD é determinante para identificar as características das impurezas e contaminantes que podem estar presentes no material. A autora afirma que esse conhecimento permite determinar se o AR pode ser utilizado para produção de betão, ou se outro uso é melhor aplicado.

SCHULZ e HENDRICKS (1992), citados por LEITE (2001) consideram importante um controle visual do RCD durante a produção. Segundo a autora existe um aumento da

disponibilidade de RCD, e esse crescimento faz com que as próprias centrais de reciclagem façam uma pré-seleção desses material, melhorando o controle do processo e qualidade dos materiais.

LEITE (2001) afirma que a é importante a remoção de substâncias e partículas nocivas dos RCD, entretanto reconhece que essa atividade não é fácil, além de prejudicar a viabilidade econômica do processo. A autora ainda afirma que tudo depende de como é realizado o beneficiamento do RCD nas centrais de reciclagem, mas é certo que a retirada manual dessas substâncias torna o processo inviável economicamente.

BRAVO (2016) em sua pesquisa encontrou partículas prejudiciais nos limites máximos impostos nas amostras de RCD, nomeadamente a presença de sulfatos. O autor sugeriu a lavagem desses AR, de forma a tornar o material adequado para misturas de betão.

VAN DER WEGEN e HAVERKORT (1998), citados por LEITE (2001) avaliaram o efeito da lavagem em AF, e concluíram que o processo pode reduzir muito o teor de finos na amostra, e reduzir a presença de cloretos e sulfatos no material. Os autores ainda realizam uma pesquisa com diferentes amostras de AFR, e estudaram a influência de lavagem, concluindo que o processo fez com que a quantidade de partículas passante no peneiro de abertura da malha de 0.063mm passar de 10% para 1.9%, se comparados os agregados não lavados com o s agregados lavados.

De acordo com LEITE (2001), JUNGSMANN e QUINDT (1998), afirmam que o método de separação de resíduo via húmida, nomeadamente a lavagem, apresenta mais benefícios que o processo de separação via seca, nomeadamente a peneiragem, pois há uma menor quantidade de pó gerada, melhor separação e classificação, e ao final o produto gerado fica praticamente livre das impurezas.

De acordo com RODRIGUES (2011), elementos que prejudicam as propriedades dos agregados miúdos possuem principalmente granulometria abaixo de 0.063 mm. Então ele também sugere a lavagem dos agregados antes do uso em amassaduras de forma a melhorar as características desse material.

Nos ensaios de RODRIGUES (2011), quando os agregados foram lavados para a realização do ensaio de massa volúmica e absorção de água, ele apontou melhora significativa na qualidade do material, sofrendo uma diminuição do seu teor de argila e praticamente eliminando partículas leves nocivas.

Previamente à lavagem, a amostra recolhida da SGR foi submetida a peneiração através do peneiro de 2 mm, de modo a eliminar as partículas acima deste valor e tentar aproximar a sua granulometria das areias naturais; tendo em vista que a amostra original é fornecida com partículas inferiores a 20 mm. É estimado que 30% da amostra recolhida foi rejeitada no processo de peneiração. Na Figura 3.2 encontra-se o RCD fornecido pela SGR, e na Figura 3.3, o material rejeitado no processo de peneiração.



*Figura 3.2-* RCD fornecido pela SGR.



*Figura 3.3-* Resíduo rejeitado após peneiração através do peneiro de 2 mm.

Na Figura 3.4, está apresentado o processo de lavagem dos AFR, no qual foi observado grande quantidade de material suspenso e também argila. Na Figura 3.5, observa-se o aspeto dos AFR ao final da lavagem. Os agregados utilizados nas amassaduras para o fabrico de betão, foram lavados no peneiro de 0.063 mm, até que a água se apresentasse visualmente limpa. Na lavagem dos agregados, observou-se constantemente a suspensão de um grande número de partículas que puderam ser identificadas visualmente como fibras de madeira e pequenos pedaços de poliestireno expandido.



*Figura 3.4- Processo de lavagem inicial dos AFR.*



*Figura 3.5- Aspeto dos AFR ao final da lavagem.*

Os AFR após a lavagem tornaram-se menos pastosos, os grãos restantes no peneiro eram perceptivelmente maiores, suas características ao toque eram mais parecidas com as da areia natural, e a água ao fim da lavagem passava com mais facilidade do peneiro. Na Figura 3.6, observa-se a diferença entre amostras do AFR lavados e não lavados.

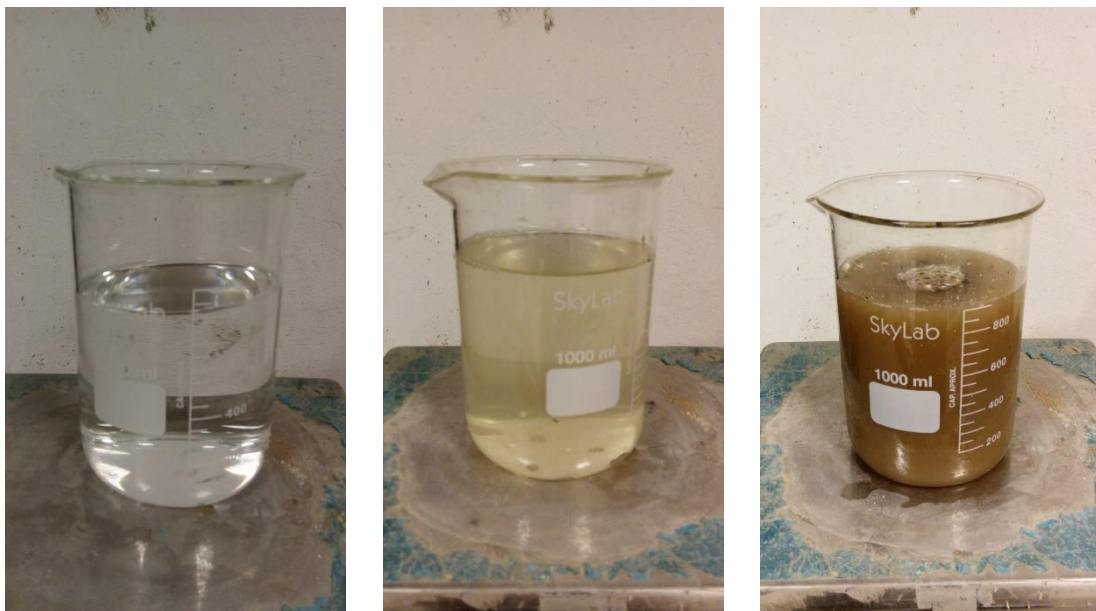


*Figura 3.6- Diferença entre amostras do AFR lavados (esquerda) e não lavados (direita).*

A lavagem dos agregados proporciona o aumento da sua qualidade pois faz com que o teor de finos seja reduzido, possibilita a remoção de contaminantes aproxima as suas características do agregado natural. Dessa forma, é lógico que os betões produzidos

com AFR lavados apresentem melhor desempenho que os produzidos com AFR não lavados. A lavagem dos AFR dá origem, por outro lado, a outros problemas, como a grande quantidade de água necessária para processo, causando grande impacto ambiental. O objetivo chave deste trabalho é comparar o desempenho de betões produzidos com AFR lavados e não lavados, e também os feitos com a água utilizada para a lavagem desses agregados ao invés da água da rede pública, de modo a tentar diminuir o impacto causado.

A água utilizada no processo de lavagem foi coletada, e decantada por um período estabelecido de 1 dia. Acredita-se que para que o uso dessa água seja economicamente viável no fabrico de betão o período em que esta água deve estar pronta para o uso deve ser o menor possível. Na Figura 3.7 apresenta-se uma comparação entre a água da rede pública, a água proveniente da lavagem imediatamente após o processo, e a água de lavagem após o período de 24 horas de decantação.



*Figura 3.7-* À esquerda, a água da rede pública; ao centro, água de lavagem após 1 dia de decantação; e à direita, água de lavagem imediatamente após a lavagem.

### 3.4. Determinação da composição do betão

O betão é uma mistura resistente muito tradicional na construção civil, e é composto por cimento, agregados, água, adições e adjuvantes.

O cimento é um aglomerante hidráulico que em contato com a água, enquanto cauda, apresenta propriedades de aderência e coesão, e conecta os diferentes compostos durante a amassadura do betão.

A água é responsável pela hidratação da mistura e pela formação da pasta de cimento, fazendo com que a massa tenha a trabalhabilidade adequada para a aplicação em diversos fins.

Os adjuvantes são substâncias que podem ser adicionados na mistura do betão de forma a modificar alguma característica do produto, por exemplo o tempo de cura do betão. Adições são materiais utilizados com a finalidade de melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais no betão. No presente trabalho não foram utilizados adições ou adjuvantes.

De seguida, começa-se por apresentar as premissas e os parâmetros utilizados na determinação da composição do betão de referência, a partir dos quais se procedeu também à determinação da composição dos betões com AR.

Nesta investigação, procedeu-se à formulação das composições dos betões produzidos de acordo com a Tabela 3.9, que apresenta valores referência em volume dos constituintes do betão apresentados no trabalho de BRAVO (2016).

Tabela 3.2: *Valores de referência para fabrico de betões.* (Adaptado de BRAVO, 2016).

Valores referência para fabrico do betão (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )									
Água rede	Cimento	Agregado natural fino	Agregado natural grosso	AR lavado	AR não lavado	Brita 1	Brita 2	Água de lavagem	Vazios
0.179	0.115	0.156	0.156	0.311	0.311	0.227	0.152	0.179	0.017

O primeiro passo no cálculo das composições dos betões foi perceber qual a quantidade necessária de provetes que foram necessários para executar todos os ensaios que foram planeados. O número de provetes foi anteriormente apresentado no início do

capítulo, e a partir desse número foi calculado o volume necessário de betão, os valores estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.3: *Volume de betão por amassadura.*

Amassadura		Nº cubos 15 x 15 cm	Nº cilindros 15 x 30 cm	Volume Betão (m <sup>3</sup> )
A01 – BR	Família 1, sub 0%	10.00	7.00	0.071
A02	Família 1, sub 25%	10.00	7.00	0.071
A03	Família 1, sub 50%	10.00	7.00	0.071
A04	Família 1, sub 100%	10.00	7.00	0.071
A05	Família 2, sub 25%	10.00	7.00	0.071
A06	Família 2, sub 50%	10.00	7.00	0.071
A07	Família 2, sub 100%	10.00	7.00	0.071
A08	Família 3, sub 0%	10.00	7.00	0.071
A09	Família 3, sub 25%	10.00	7.00	0.071
A10	Família 3, sub 50%	10.00	7.00	0.071
A11	Família 3, sub 100%	10.00	7.00	0.071
Total (m <sup>3</sup> )		110.00	77.00	0.779

Após o cálculo do volume de betão necessário para realizar todos os ensaios, pode-se calcular o volume de cada um dos compostos presentes no betões de cada amassadura (Tabela 3.11), a partir da relação desse valor com a tabela apresentada de BRAVO (2016) (Tabela 3.9). Os valores na tabela seguinte são correspondentes ao metro cúbico de material presente em um metro cúbico de betão de acordo com BRAVO (2016).

Tabela 3.4: *Volume dos compostos da mistura por amassadura.*

Amassa-dura	Água rede (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Água de lavagem (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Cimento (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	AN fino (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	AN grosso (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	AR lavado (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	AR não lavado (Kg)	Brita 1 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Brita 2 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Vazios (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
A01 - BR	0.013	-	0.008	0.011	0.011	-	-	0.016	0.011	0.001
A02	0.013	-	0.008	0.008	0.008	-	0.006	0.016	0.011	0.001
A03	0.013	-	0.008	0.006	0.006	-	0.011	0.016	0.011	0.001
A04	0.013	-	0.008	-	-	-	0.022	0.016	0.011	0.001
A05	0.013	-	0.008	0.008	0.008	0.006	-	0.016	0.011	0.001
A06	0.013	-	0.008	0.006	0.006	0.011	-	0.016	0.011	0.001
A07	0.013	-	0.008	-	-	0.022	-	0.016	0.011	0.001
A08	-	0.013	0.008	0.011	0.011	-	-	0.016	0.011	0.001
A09	-	0.013	0.008	0.008	0.008	0.006	-	0.016	0.011	0.001
A10	-	0.013	0.008	0.006	0.006	0.011	-	0.016	0.011	0.001
A11	-	0.013	0.008	-	-	0.022	-	0.016	0.011	0.001
Total	0.089	0.051	0.090	0.063	0.063	0.077	0,039	0.177	0.118	0.013

A quantidade de cimento na mistura e a relação a/c são duas características importantes na formulação dos betões. O cimento é responsável pelo endurecimento da mistura, provendo a resistência e a durabilidade dos betões, então é de suma importância definir uma dosagem de cimento que proporcione atingir os requisitos mínimos especificados. Entretanto a quantidade de cimento na mistura deve ser economicamente viável e ambientalmente aceitável. A especificação LNEC E-464 (2007) aponta limites inferiores e superiores para a quantidade de cimento e relação a/c nas misturas de betão. Para o cimento utilizado, Tipo I 42.5 R, a dosagem mínima de cimento é 280 kg/m<sup>3</sup> e uma relação a/c máxima de 0.60.

Segundo a fórmula de Bolomey (LOURENÇO E COUTINHO, 1986), a dosagem de cimento adequada para um betão de classe de resistência C30/37, utilizando-se um cimento da classe 42.5 R, é de 380 kg/m<sup>3</sup>. Tendo em consideração os valores de referência assinalados por BRAVO (2016) e os diversos aspectos referidos nesta investigação, optou-se por se definir uma dosagem de cimento de 360 kg/m<sup>3</sup> para todas as misturas produzidas.

Após a obtenção dos resultados dos ensaios para determinar a massa volúmica dos agregados reciclados e de absorção de água, pôde-se relacionar os volumes necessários de cada material com os respectivas massas volúmicas para determinar o

peso dos compostos a ser utilizado em cada uma das amassaduras. A Tabela 3.12 mostra as massas volúmicas que foram consideradas nos cálculos.

Tabela 3.5: *Pesos específicos dos materiais.*

Água rede (Kg)	Água de lavagem (Kg)	Cimento (Kg)	AN fino (Kg)	AN grosso (Kg)	AR lavado (Kg)	AR não lavado (Kg)	Brita 1 (Kg)	Brita 2 (Kg)
1000.00	1000.00	3150.00	2600.00	2590.00	2224.69	2086.75	2630.00	2690.00

Foi ainda acrescentada uma quantidade de água além da sugerida na Tabela 3.11, essa quantidade diz respeito a água que será absorvida pelos agregados, tendo em conta que foi determinado que não haveria pré-saturação desses materiais, decidiu-se pela compensação. A Tabela 3.13 a seguir apresenta o cálculo final das quantidades.

Tabela 3.6: *Quantidades dos compostos das amassaduras.*

Amassadura	Água rede (L)	Água de lavagem (L)	Cimento (Kg)	AN fino (Kg)	AN grosso (Kg)	AR lavado (Kg)	AR não lavado (Kg)	Brita 1 (Kg)	Brita 2 (Kg)
A01 – BR	14.081	-	25.669	28.649	28.538	-	-	42.379	28.897
A02	13.961	-	25.669	21.486	21.404	-	11.497	42.379	28.897
A03	13.840	-	25.669	14.324	14.269	-	22.993	42.379	28.897
A04	13.600	-	25.669	0.000	0.000	-	45.987	42.379	28.897
A05	13.958	-	25.669	21.486	21.404	12.257	-	42.379	28.897
A06	13.836	-	25.669	14.324	14.269	24.513	-	42.379	28.897
A07	13.591	-	25.669	-	-	49.026	-	42.379	28.897
A08	-	14.081	25.669	28.649	28.538	-	-	42.379	28.897
A09	-	13.958	25.669	21.486	21.404	12.257	-	42.379	28.897
A10	-	13.836	25.669	14.324	14.269	24.513	-	42.379	28.897
A11	-	13.591	25.669	-	-	49.026	-	42.379	28.897

As composições dos betões produzidos com AFR tiveram por base a composição do betão de referência (A01). Durante as amassaduras procurou-se sempre utilizar a menor relação a/c possível, iniciando se sempre a mistura com o primeiro cálculo, porém em algumas situações foi necessário fazer um ajuste na quantidade de água e cimento, de forma a se atingir os parâmetros previamente imaginados de trabalhabilidade.

### 3.5. Ensaios realizados nos agregados finos reciclados

Os agregados são os materiais que representam a maioria dos constituintes do betão. Dessa forma é essencial conhecer-se as propriedades dos agregados presentes nas misturas, uma vez que esse material influencia significativamente nas características e desempenho do betão. Os ensaios e o conhecimento das propriedades dos agregados é de suma importância nesta campanha experimental, visto que deve-se entender qual o efeito das porcentagens de substituição no comportamento do betão.

#### 3.5.1. Análise granulométrica

A granulometria dos agregados presentes no betão influencia fortemente as características do mesmo. A granulometria afeta a compacidade da mistura e, conseqüentemente, a trabalhabilidade, a segregação e o desempenho do betão em termos mecânicos e de durabilidade (ICAR104, 2004, citado por BRAVO, 2016).

A metodologia na análise granulométrica seguirá a NP EN 933-1 (2000) “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração”. A definição da malha dos peneiros utilizada neste ensaio está contida na norma 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”, de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.7: *Dimensões de abertura dos peneiros, de acordo com a NP EN 933-2.*

Abertura da malha dos peneiros (mm)											
0.063	0.125	0.250	0.500	1.00	2.00	4.00	8.00	16.0	31.5	63.0	125

Para o ensaio da análise granulométrica, foi utilizado o seguinte equipamento:

- peneiros com malha com abertura superior a 4 mm em conformidade com a ISO 3310-2 e com abertura até 4 mm segundo a ISO 3310-1;
- balança de precisão;
- estufa ventilada que mantenha a temperatura a  $110 \pm 5$  °C;

O procedimento utilizado foi o seguinte:

- A amostra do RCD, de pelo menos 10 kg, para agregados com máxima dimensão até 32 mm, de acordo com a NP EN 933-1, foi seca na estufa a 110°C, até a massa constante;
- A amostra foi colocada nos peneiros empilhados um sobre os outros, encaixados, dispostos de forma que o primeiro peneiro tenha a maior abertura.
- Os peneiros foram agitados até que a amostra retida em cada peneiro não seja alterada mais de 1% após 1 minuto de agitação;
- O material retido em cada peneiro foi pesado.

A Tabela 3.3 a seguir apresenta o resultado do ensaio:

Tabela 3.8: *Distribuição granulométrica da amostra.*

Abertura da malha (mm)	Massa retida (kg)	% retida
31.5	0.000	0.000
16	0.060	0.463
8	0.650	5.012
4	1.490	11.488
2	1.460	11.257
1	2.030	15.652
0.5	2.980	22.976
0.25	2.860	22.051
0.125	0.960	7.402
0.063	0.310	2.390
Fundo	0.170	1.311
Total	12.970	

### 3.5.2. Massa volúmica e absorção de água

Segundo BRAVO (2016), a norma NP EN 1097-6 (2003) “Determinação da massa volúmica e da absorção de água”, adequada para agregados naturais finos, não considera algumas peculiaridades dos agregados reciclados finos. Ele afirma que os AFR possuem uma grande heterogeneidade de suas partes, contendo partículas muito finas (abaixo de 0.063 mm), com uma grande capacidade de coesão. Por outro lado, devido à presença de betão nos AFR, deve-se considerar a capacidade de coesão e ligante que os AFR oriundos de betão apresentam, devida à presença de cimento que poderão estar hidratadas. EVANGELISTA (2014) citado por BRAVO (2016), provou esse fenómeno durante o processo de saturação de AFR de betão, quando observou a

formação de uma camada endurecida de AFR, de difícil desagregação. Então, BRAVO (2016) sugeriu uma nova metodologia, que foi utilizada no presente trabalho, para a determinação da massa volúmica e absorção de água dos AFR, e com esse novo ensaio, visa-se evitar a coesão dos AFR ao longo do ensaio, obtendo-se valores mais rigorosos para a absorção de água destes agregados.

De acordo com esse novo procedimento, as amostras dos AFR são ensaiadas em uma primeira etapa, através do ensaio do picnómetro, especificado na NP EN 1097-6 (2003), mas sendo a amostra imersa numa solução de hexametáfosfato de sódio (ver Figura 3.8). De acordo com SIX *et al.* (2000) citados por BRAVO (2016), este composto possui características que o tornam um dispersante de partículas, estando a sua aplicação normalizada (ASTM D422-63, 2007, citado por BRAVO, 2016). O composto também é utilizado para tornar a presa mais lenta segundo RAMACHANDRAN *et al.* (2002) citados por BRAVO (2016). BRAVO (2016) utilizou uma solução de hexametáfosfato de sódio em água destilada de 1g/l, conforme indicado por MOURA (1998), a mesma concentração foi adotado no ensaio desta pesquisa. O uso da solução é importante pois a argila aumenta a coesão entre os grãos do agregado (Figura 3.9).



Figura 3.8- Hexametáfosfato de sódio.



Figura 3.9- Efeito de coesão da argila no AFR.

Para o ensaio do picnómetro, foram necessários os equipamentos listados:

- estufa ventilada que mantenha a temperatura a  $110 \pm 5$  °C;
- balança de precisão;
- termómetro;

- peneiro de 0,063 mm;
- picnómetro com volume de 1000 ml;
- molde metálico troncocónico, com 40 mm de diâmetro superior e 90 mm de diâmetro na base, com 75 mm de altura e uma espessura de 0,8 mm;
- pilão metálico com face de apiloamento plana e circular;
- fonte de ar quente, foi utilizado um pequeno aquecedor com ventilador;
- filtro de papel.

De acordo com a norma NP EN 1097-6 (2003), a massa da amostra a utilizar neste ensaio do método do picnómetro (grãos entre 0.063 mm e 4 mm) deve ser maior ou igual a 1 kg, sendo realizado neste trabalho um ensaio por amostra.

O procedimento utilizado foi o seguinte:

- a NP EN 1097-6 (2003), pede que se leve a amostra sobre o peneiro 0,063 mm para retirar os finos. Nesse caso foi realizado um ensaio com a amostra lavada, e outro sem a lavagem, a qual exclui-se esse passo neste último caso.
- a amostra lavada foi submergida em água, e a não lavada na solução de hexametáfosfato de sódio durante 24 horas dentro do picnómetro;
- Para se poder quantificar a evolução da absorção de água dos AFR ao longo do tempo, BRAVO (2016) pesou a amostra em balança hidrostática, com as amostras na solução de hexametáfosfato de sódio, então posteriormente foram feitas leituras regulares durante os primeiros 10 minutos, espaçando-se as leituras a partir desse instante. A partir da primeira hora de ensaio, foram efetuadas leituras de hora a hora até atingir 24 h de ensaio, conforme registado na patente nacional PT 105921 (RODRIGUES et al., 2013, citados por BRAVO, 2016). De acordo com BRAVO (2016) estas pesagens, em conjunto com a absorção de água potencial às 24 horas, permite o traçado do gráfico de desenvolvimento da absorção de água ao longo do tempo.
- De forma a facilitar a execução do ensaio, neste trabalho a amostra foi imersa na solução de hexametáfosfato de sódio dentro do picnómetro, e este foi cheio até a linha de acordo com a norma NP EN 1097-6 (2003) após um período de  $24 \pm 1$  h, e imediatamente pesado. Então:
- após as 24 horas, foram retiradas as bolhas de ar presas entre as partículas da amostra agitando com cuidado o picnómetro,

- o picnómetro foi enchido até o nível com água para o agregado lavado (Figura 3.10) e a solução de defloculante para o agregado não lavado (Figura 3.11), o peso foi registrado como  $M_3$ ;



Figura 3.10- Pesagem do AR lavado no teste do picnómetro.

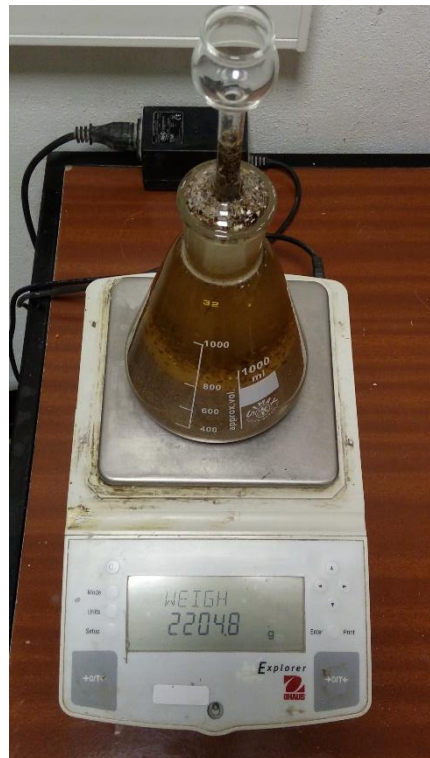


Figura 3.11- Pesagem do AR não lavado no teste do picnómetro.

- foi decantada parte da água, com o devido cuidado para não se perder parte da amostra;
- foi despejado o conteúdo do picnómetro sobre o filtro, com cuidado para que partículas não sejam perdidas, após o agregado escorrer o excesso de água foi colocado em um tabuleiro;
- a amostra então foi exposta a uma corrente de ar quente, de modo que a humidade da superfície fosse evaporada (Figura 3.12). O agregado foi revirado em pequenos intervalos de tempo de modo a assegurar a secagem homogénea dos grãos;



*Figura 3.12- Secagem da superfície do AR.*

- para avaliar o estado do agregado saturado com a superfície seca, uma parte da amostra foi colocada no molde troncocónico (Figura 3.13) , e então foi compactada com 25 apiloamentos aplicado apenas com o peso do pilão. Após o levantamento do molde o agregado manteve o aspecto de acordo com a NP EN 1097-6 (2003), apresentado na Figura 3.14;



*Figura 3.13- Molde troncocónico e pilão.*



*Figura 3.14- Agregado saturado com superfície seca após remoção do molde troncocónico.*

- O agregado saturado com a superfície seca foi pesado e chamada a massa de ( $M_1$ );
- a amostra foi colocada na estufa ventilada à temperatura de  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  até que a massa constante;
- a amostra foi novamente pesada e chamada massa ( $M_4$ );
- por fim foi pesado o picnómetro com água e obtida a massa ( $M_3$ ).

As equações utilizadas nos ensaios são:

$$\rho a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \rho_w \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$\rho r d = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \rho_w \quad (\text{Equação 3.2})$$

$$\rho s s d = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \rho_w \quad (\text{Equação 3.3})$$

$$W A 24 = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \quad (\text{Equação 3.4})$$

Em que:

$\rho a$  - massa volúmica do material impermeável das partículas ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$\rho r d$  - massa volúmica das partículas secas em estufa ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$\rho s s d$  - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$\rho_w$  - massa volúmica da água ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$W A 24$  - absorção de água após imersão em água durante 24 h (%);

$M_1$  - massa do agregado saturado com superfície seca (g);

$M_2$  - massa do picnómetro contendo o provete imerso na água e saturado (g);

$M_3$  - massa do picnómetro cheio de água (g);

$M_4$  - massa do provete de ensaio seco em estufa (g).

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 3.4 e na Tabela 3.5.

Tabela 3.9: *Resultados do ensaio do picnómetro nos AR lavados.*

Agregados reciclados lavados			
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar ( $M_1$ ) (g)	Massa picnómetro contendo o provete de agregado saturado ( $M_2$ ) (g)	Massa do picnómetro apenas cheio de água ( $M_3$ ) (g)	Massa do ar do provete seco em estufa ( $M_4$ ) (g)
1042.154	2215.700	1618.300	991.600
Massa volúmica do material impermeável das partículas ( $\text{kg/m}^3$ )			2509.991
Massa volúmica das partículas secas em estufa ( $\text{kg/m}^3$ )			2224.687
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ( $\text{kg/m}^3$ )			2338.106
Absorção de água			5.0%

Tabela 3.10: *Resultados do ensaio do picnómetro nos AR não lavados.*

Agregados reciclados não lavados			
Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar ( $M_1$ ) (g)	Massa picnómetro contendo o provete de agregado saturado ( $M_2$ ) (g)	Massa do picnómetro apenas cheio de água ( $M_3$ ) (g)	Massa do ar do provete seco em estufa ( $M_4$ ) (g)
1056.922	2204.800	1618.300	983.800
Massa volúmica do material impermeável das partículas ( $\text{kg/m}^3$ )			2470.816
Massa volúmica das partículas secas em estufa ( $\text{kg/m}^3$ )			2086.754
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ( $\text{kg/m}^3$ )			2241.855
Absorção de água			7.43%

### 3.5.3. Determinação do teor de finos

A norma EN 12620 define finos como a parte do agregado que passa no peneiro de 0.063 mm. Segundo a Associação Portuguesa das Empresas de betão Pronto, essas partículas finas podem ser argilas ou pó de pedra originário da fragmentação durante o processo de britagem.

Segundo RODRIGUES (2011) partículas finas envolvem os grãos do agregado, o que pode prejudicar a aderência com a pasta de cimento, provocando conseqüentemente um pior desempenho do betão o autor ainda afirma que essas partículas podem também fazer com que seja necessário mais água na amassadura, e também causar

variabilidade na quantidade de água entre amassaduras. Dessa forma é preciso verificar o teor de finos, e qual a sua influência nas propriedades do betão. A NP EN 933-8 (2002) “Ensaio do equivalente de areia. Parte 8: Determinação do teor de finos”, define um método para determinar o equivalente de areia da fração 0/2 mm em agregados finos.

Os agregados finos são colocados em uma proveta cilíndrica graduada um provete de areia e posteriormente uma solução flocculante (Figuras 3.15 e 3.16). A proveta então é agitada de modo a libertar a argila da areia. Em seguida deve-se irrigar a areia com a solução flocculante, para que partículas menores entrem em suspensão. Após 20 minutos o equivalente de areia é calculado pela altura do sedimento, expressa como uma percentagem da altura total do material flocculado.



*Figura 3.15-* AFR não lavado na proveta.



*Figura 3.16-* AFR lavado na proveta.

Os equipamentos necessários ao ensaio são os seguintes:

- 2 provetas graduadas com duas marcas de referência;
- conjunto do mergulhador do ensaio;
- máquina vibratória;
- peneiro de ensaio de 2 mm;
- balança;
- termómetro;
- filtro de papel.

Para o ensaio do equivalente de areia é necessário a preparação de uma solução que é composta por:

- 219 g de cloreto de cálcio;
- 480 g de glicerina, 99% glicerol;
- 12.5 g de formaldeído, 40% em volume;
- 6.350 L de água destilada.

O procedimento para a execução do ensaio foi o seguinte:

- foram separadas e pesadas duas amostras de 120 g do AFR não lavado, e segundo a NP EM 9333-8 (2002) os agregados ensaiados devem passar pelo peneiro de 2 mm;
- foi preparada a solução já descrita;
- cada uma das provetas foi enchida com a solução até a marca de referência inferior, e em seguida, a mostra de 120 g foi introduzida em cada uma das provetas;
- após aguardar 10 minutos, as provetas foram seladas com rolhas de borrachas e colocadas na máquina de vibração;
- as amostras foram vibradas por 30 segundos para um total de 90 ciclos;
- as rolhas foram retiradas, e em seguida enxaguadas com a solução de lavagem, com o devido cuidado para todo o material cair dentro da proveta cilíndrica;
- o tubo de lavagem foi introduzido nas provetas, e agitado em movimentos circulares;
- as provetas foram cheias até o traço de referência superior com a solução de lavagem ao mesmo tempo que foi retirado o tubo de lavagem;
- após aguardar 20 minutos o assentamento da amostra, foi medida a altura  $h_1$ ;
- o conjunto mergulhador foi inserido até a ponta assentar sobre o sedimento;
- o anel do topo da proveta foi bloqueado no varão do mergulhador;
- foi medida a altura  $h_2$ ;
- todo o procedimento foi repetido para duas novas provetas do AFR lavados.

Após a realização do ensaio deve-se calcular a razão entre as alturas para cada proveta cilíndrica, arredondada a uma casa decimal, utilizando a equação:

$$\frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (\text{Equação 3.5})$$

O resultado para o equivalente de areia é a média dos resultados e está representado na Tabela 3.6 abaixo.

Tabela 3.11: *Resultados do ensaio do equivalente de areia.*

Resultados ensaio do equivalente de areia				
AFR não lavados				
Provete 1		Provete 2		SE
h1 (mm)	124	h1 (mm)	123	83.82%
h2 (mm)	101	h2 (mm)	106	
AFR lavados				
Provete 1		Provete 2		SE
h1 (mm)	106	h1 (mm)	107	99.06%
h2 (mm)	105	h2 (mm)	106	

### 3.5.4. Baridade e volume de vazios

O ensaio utilizado para determinar a baridade e volume de vazios seguirão a norma NP EN 1097-3 (2003) “Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios”. Para realizar o ensaio, foi necessário o equipamento descrito a seguir:

- balde metálico com capacidade de pelo menos 1 litro;
- balança;
- estufa;
- régua para nivelamento.

De acordo com a norma NP EN 932-2, o ensaio deve ser realizado em 3 provetes. Primeiramente os AR foram colocados em estufa a  $110 \pm 5$  °C até a massa constante. De acordo com a norma a massa de cada amostra deve estar compreendida entre 120% e 150% da massa necessária para encher o balde. O procedimento do ensaio está descrito a seguir:

- foi determinada a massa de água necessária para encher o balde, esse valor em litros foi anotado como (V);
- o balde metálico foi limpo, seco e pesado, o valor foi anotado como ( $M_1$ );
- o balde foi cheio com a amostra do agregado até o transbordo, tendo sempre o cuidado de diminuir a distância de queda do material;
- o excesso de material foi removido e o topo foi nivelado com a ajuda de uma régua de modo que o volume dos agregados se aproxime do volume do balde;

- o balde foi pesado e a massa obtida foi anotada como ( $M_2$ );
- o ensaio foi realizado 3 vezes para os AFR lavados e 3 vezes para os AFR não lavados.

A baridade e a percentagem média de vazios serão determinadas a partir das equações:

$$Pb = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \times 100 \quad (\text{Equação 3.6})$$

$$v = \frac{P_p - P_b}{P_p} \times 100 \quad (\text{Equação 3.7})$$

Em que:

$v$  - percentagem média de vazios (%);

$\rho_b$  - baridade ( $\text{kg/m}^3$ );

$\rho_p$  - massa volúmica das partículas secas em estufa ( $\text{kg/m}^3$ );

$M_1$  - massa do recipiente de ensaio (kg);

$M_2$  - massa do recipiente com o provete de ensaio (média dos 3 provetes) (kg);

$V_r$  - volume do recipiente ( $\text{m}^3$ ).

A Tabela 3.7 e a Tabela 3.8 apresentam os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 3.12: Resultados do ensaio da baridade e volume de vazios nos AR não lavados.

AFR não lavados					
Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pesagem (Kg)=	8.310	Pesagem (Kg)=	8.302	Pesagem (Kg)=	8.399
$\rho_b$ - baridade ( $\text{kg/m}^3$ );					1249.669
$v$ - percentagem média de vazios (%);					40.11%
$\rho_p$ - massa volúmica das partículas secas em estufa ( $\text{kg/m}^3$ );					2086.754
$M_1$ - massa do recipiente de ensaio (kg);					4.563
$M_2$ - massa do recipiente com o provete de ensaio (kg);					8.337
$V_r$ - volume do recipiente ( $\text{m}^3$ ).					0.003

Tabela 3.13: Resultados do ensaio da baridade e volume de vazios nos AR lavados.

AFR lavados					
Provete 1		Provete 2		Provete 3	
Pesagem (Kg)=	8.044	Pesagem (Kg)=	8.176	Pesagem (Kg)=	8.219
pb - baridade (kg/m <sup>3</sup> );					1186.534
v - percentagem média de vazios (%);					46.67%
pp - massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m <sup>3</sup> );					2224.687
M <sub>1</sub> - massa do recipiente de ensaio (kg);					4.563
M <sub>2</sub> - massa do recipiente com o provete de ensaio (kg);					8.146
Vr - volume do recipiente (m <sup>3</sup> ).					0.003

### 3.6. Ensaaios em betões no estado endurecido

#### 3.6.1. Resistência à compressão

Este ensaio objetiva determinar a capacidade resistente do betão sob tensão uniforme de compressão. O ensaio é a descrito na norma NP EN 12390-3 (2009) “Ensaaios ao betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”.

As características relativas à geometria e dimensões dos provetes de ensaio estão presentes na norma NP EN 12390-1 (2003) “Ensaaios ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes”.

Sobre a execução e cura dos provetes, os métodos estão especificados na NP EN 12390-2 (2003) “Ensaaios ao betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica”. Foram utilizados provetes cúbicos de 15 cm (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Ensaio de resistência à compressão axial.

Para se avaliar a evolução da resistência à compressão dos diversos betões, foram ensaiadas provetes de betão com variações em sua composição, nomeadamente nas percentagens de substituição de agregados naturais por AFR e substituição de água de amassadura da rede pública por água usada na lavagem dos AFR com o tempo de decantação de 1 dia.

A resistência à compressão dos provetes é fornecida pela equação:

$$f_c = F/A_c \quad \text{(Equação 3.8)}$$

Em que:

$f_c$  - resistência à compressão do provete (MPa);

$F$  - carga máxima (N);

$A_c$  - área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm<sup>2</sup>).

### 3.6.2. Resistência à tração por compressão diametral

Segundo BRAVO (2016) a principal função estrutural do betão é resistir aos esforços de compressão, porém a sua resistência à tração é importante para estruturas em alguns casos, como na resistência ao corte, aderência aço-betão ou na fendilhação. Ainda segundo o autor, a tensão de ruptura do betão à tração pode ser encontrada por tração

pura, flexão simples ou compressão diametral, mas ainda cita a dificuldade do primeiro ensaio, que leva à opção por um dos outros dois.

Para determinar a resistência à tração dos betões optou-se pelo ensaio de resistência a tração por compressão diametral, pela simplicidade de execução, e também pelo facto que fornece valores mais próximos do ensaio da tração pura segundo POPOVICS, MONTROYA *et al.* (2001), citados por BRAVO (2016).

O ensaio é descrito pela norma NP EN 12390-6 (2003) “Ensaio ao betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão dos provetes”. Para cada família de betão este ensaio será realizado com 7, 28 e 91 dias de idade dos provetes. Os provetes tem o formato cilíndrico com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura (Figura 3.18).



Figura 3.18- Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A resistência à tração por compressão diametral é fornecida pela seguinte equação:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad \text{(Equação 3.9)}$$

Em que:

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

$F$  - carga máxima (N);

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

$d$  - dimensão da secção transversal (mm).



## 4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

O objetivo deste capítulo é realizar uma descrição dos ensaios, apresentar os resultados obtidos, assim como a análise, discussão e comparação com outros trabalhos previamente desenvolvidos.

### 4.1. Propriedade dos agregados finos reciclados

#### 4.1.1. Curva granulométrica

De acordo com o ACI 211,2 (1998), citado por BRAVO (2016) uma distribuição granulométrica contínua reduz a quantidade de vazios, e assim, é necessário menos pasta de cimento para preenchimento. O autor ainda cita o ICAR104 (2004), quando diz que a granulometria dos agregados afeta a trabalhabilidade da amassadura, a segregação, durabilidade e a resistência do betão, uma vez que influencia a compactação da mistura.

O RCD obtido na central SGR foi peneirado e separado em diferentes dimensões. Os resultados obtidos na análise granulométrica então apresentados na Tabela 3.3 e na Figura 4.1 pode-se observar a curva granulométrica.

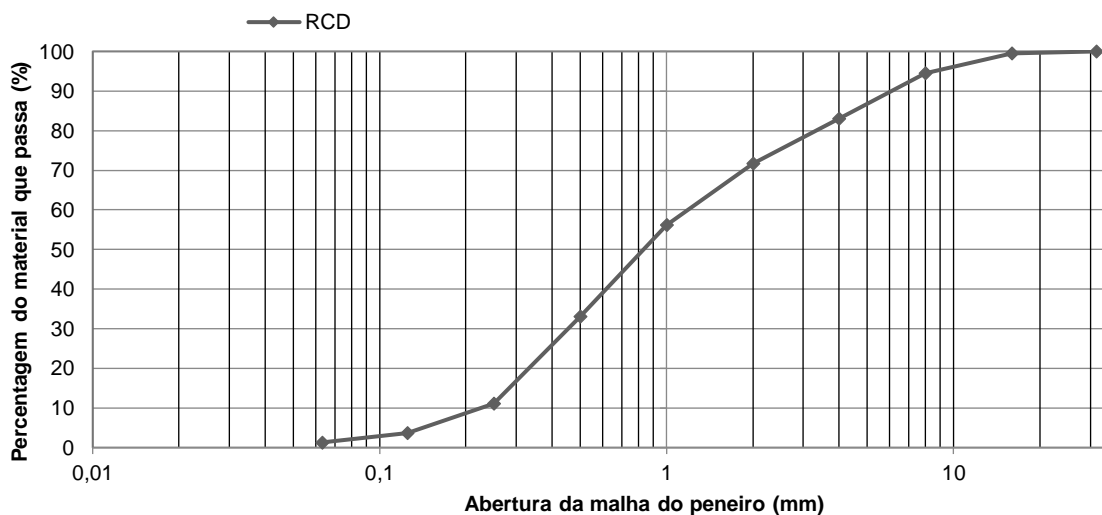


Figura 4.1- Curva granulométrica do RCD.

Como observado por RODRIGUES (2011), um fato a ser considerado ao observar-se as curvas granulométricas é a existência de partículas, de dimensão inferior à malha do último peneiro. Ainda segundo o autor, graças à presença de argamassas nos RCD, os AR fragmentam-se com maior facilidade do que os naturais. Pode-se observar na amostra ensaiada que 1.31% do material passou pelo último crivo, o que indica a existência de partículas muito finas na amostra. Pode-se observar que os RCD ensaiados apresentam uma granulometria que pode ser considerada extensa, tendo grãos passados pelo último peneiro de 0,063mm, e grãos de dimensões entre 31.5 e 16 mm. Para se perceber como a granulometria dos RCD se distingue da granulometria dos AN, nas Tabelas 4.2 e 4.3 estão apresentadas as dimensões dos grãos desses materiais que foram utilizados nas amassaduras.

Tabela 4.1: *Granulometria AN 0/2 mm.*

Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)	% retida
31,5	0.000	0.000
16	0.000	0.000
8	0.000	0.000
4	0.000	0.000
2	0.400	0.080
1	2.100	0.400
0,5	100.700	19.220
0,25	332.000	63.360
0,125	87.600	16.720
0,063	1.200	0.230
Fundo	0.000	0.000
Total	524.000	

Tabela 4.2: Granulometria AN 0/4 mm.

Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)	% retida
31,5	0.000	0.000
16	0.000	0.000
8	0.000	0.000
4	26.000	3.360
2	115.000	14.880
1	304.700	39.410
0,5	263.000	34.020
0,25	55.000	7.110
0,125	739.000	1.020
0,063	1.500	0.190
Fundo	0.000	0.000
	773.100	

A Figura 4.2 que apresenta a comparação das curvas granulométricas dos RCD e dos agregados naturais finos.

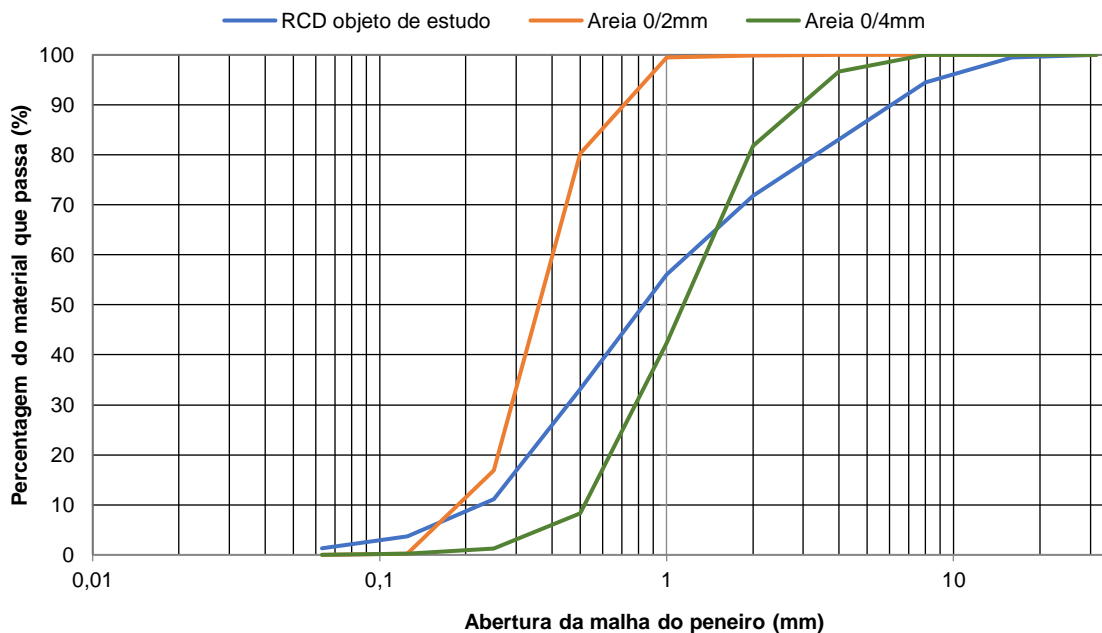


Figura 4.2- Comparação das curvas granulométrica do RCD e dos AFN.

Pode-se observar pela Figura 4.2 que os RCD apresentam curvas granulométricas distintas dos agregados naturais finos. Os RCD estudados possuem uma granulometria

extensa, enquanto os agregados naturais finos possuem uma granulometria mais uniforme. Segundo a norma NP EN 206-1 (2007), agregados de granulometria extensa com a maior dimensão de grãos até 45 mm, não devem ser utilizados na amassadura de betões com classe de resistência maior que C12/15. Contudo, quer nos RCD quer nas areias esta situação não se verifica. A granulometria dos RCD está condicionada à sua origem, à central de reciclagem, ao método utilizado de britagem e ao crivo passado na própria central. Dessa forma o que se procurou fazer foi passar todo o RCD no peneiro de 2 mm, de forma a se utilizar uma parte desse agregado, com granulometria menor e conhecida, de característica mais contínua, como pede a norma.

Um outro fator que deve ser observado é que a lavagem dos agregados deve proporcionar além da eliminação das partículas inferiores a 0.063 mm, uma redução nos finos presentes na composição, fazendo que com o agregado reciclado tenha a sua propriedade granulométrica um pouco mais contínua.

Uma outra comparação feita foi a curva granulométrica dos RCD estudados nesta pesquisa com as curvas obtidas no estudo de RODRIGUES (2011), de agregados finos obtidos na mesma central de reciclagem de dois crivos diferentes (Figura 4.3).

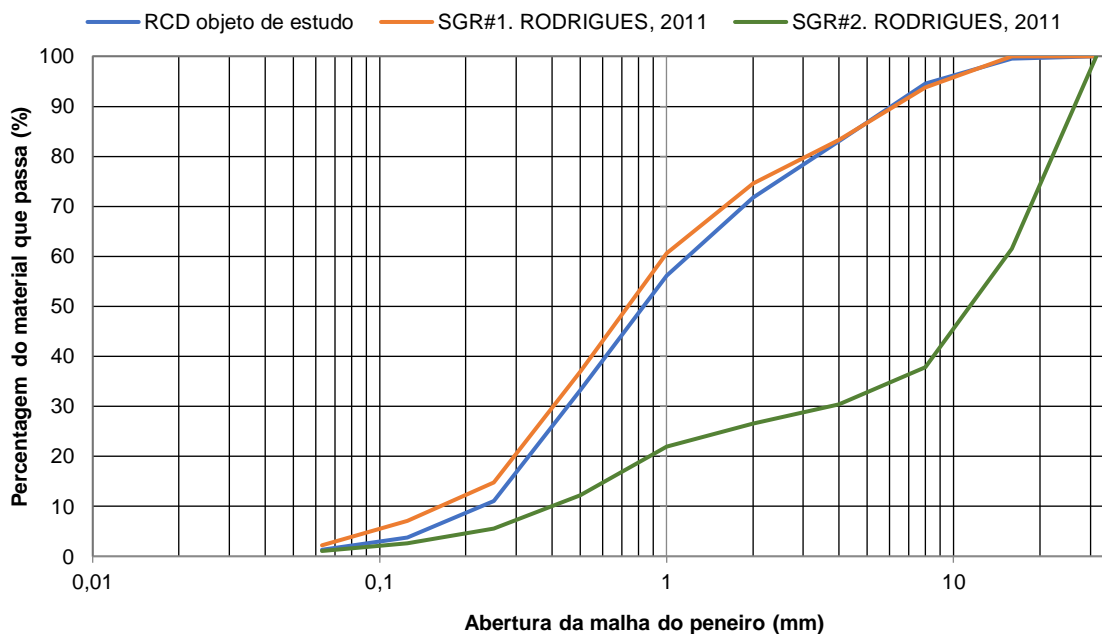


Figura 4.3- Comparação das curvas granulométrica de amostras da central SGR.

Ao analisar a figura nota-se que a curva obtida no ensaio para os RCD deste trabalho e a curva obtida por RODRIGUES (2011) para a amostra do primeiro crivo (SGR#1) são

praticamente iguais. Mesmo com anos de diferença entre a obtenção das amostras, percebe-se que existe uma consistência nas características relativas à dimensão dos RCD. A amostra do segundo crivo do autor reforça a tese que a passagem no crivo durante o processamento e britagem influencia fortemente nas dimensões do produto final.

#### **4.1.2. Teor de finos**

O ensaio do equivalente de areia teve como objetivo avaliar a quantidade de areia e conseqüentemente o teor de finos presente na amostra de AFR lavado e não lavado.

No ensaio da amostra de AFR não lavado encontrou-se o resultado de 83.82% de areia no provete, o que significa uma percentagem de pouco mais de 16% de finos. Valor considerado alto, o que mostra que existe uma parcela significativa de finos e argila nos AFR. Esta composição deverá influenciar negativamente o comportamento dos betões. No caso da argila como já referido, diminui fortemente a resistência nos betões.

No que respeita ao valor de AFR lavado, verificou-se um valor baixo no teor de fino. O valor para a areia é de 99.06%. Comparando os dois resultados, verifica-se que a lavagem dos agregados possui uma grande capacidade de eliminar os finos e as argilas, reduzindo a menos de 1% o teor desses compostos, sendo que é esperado que os betões que forem produzidos com os agregados lavados terão melhor desempenho em relação aos produzidos com os não lavados.

Segundo GONÇALVES (2007), os finos presentes nos agregados, por terem maior propensão a carregarem contaminantes, podem afetar as propriedades mecânicas do betão e, as normas em sua maioria vetam a utilização dos AR que carregam esses materiais na produção de betão. Ainda segundo o autor as normas brasileira e japonesa são exceções, a utilização é permitida, mas explicada pelo baixo grau de exigência de desempenho desses betões. As normas dinamarquesas e suíças permitem o uso desses materiais em betões com usos estruturais, porém nesses países existe requisitos que devem ser respeitados quanto à composição dos AFR.

De acordo com a NP EN 933-8 (2002), o teor de finos apresentado pelo AFR não lavado é mais alto que o permitido para o uso do agregado em betões, porém nessa pesquisa utilizou-se o material a fim de conhecer o comportamento mecânico do betão feito com esse AFR.

### 4.1.3. Baridade e volume de vazios

A baridade e o volume de vazios são obtidos a partir do ensaio descrito anteriormente, e estão conectadas, visto que a baridade será tanto menor quanto maior for o volume de vazios. É importante conhecer a baridade dos agregados tendo em vista que quanto maior for a baridade, melhor será o desempenho do betão.

O procedimento do ensaio foi já descrito neste trabalho e os resultados do ensaio encontram-se nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.3: *Baridade e volume de vazios dos AFR não lavados.*

AFR não lavados	
$\rho_b$ - baridade (kg/m <sup>3</sup> );	1249.669
v - percentagem média de vazios (%);	40.11%

Tabela 4.4: *Baridade e volume de vazios dos AFR lavados.*

AFR lavados	
$\rho_b$ - baridade (kg/m <sup>3</sup> );	1186.534
v - percentagem média de vazios (%);	46.67%

A baridade é a massa por unidade de volume aparente de um conjunto de agregados. Esta varia de acordo com a compactação, granulometria e também com a forma dos grãos do agregado. Quanto maior for a regularidade das partículas, maiores serão os espaços vazios entre as mesmas. Uma maior irregularidade permite um melhor encaixe das partículas, levando a uma maior baridade (RODRIGUES, 2011).

De acordo com COUTINHO (1997), os AFR não lavados que foram analisados nesta pesquisa encontram-se na categoria de baridade densa, sendo 1200 a 1600 kg/m<sup>3</sup>. ainda segundo o autor, esses agregados podem ser utilizados para produzir betões com função estrutural para uma função resistente, tendo em conta esta baridade. Os AFR lavados, embora tenham a baridade muito próxima de 1200 kg/m<sup>3</sup>, encontram-se na categoria leve, entre 300 e 1200 kg/m<sup>3</sup>, sendo o uso aconselhado para funções de isolamento térmico, betões estruturais com função de resistência, e diminuição do peso próprio do betão.

Observa-se que ao lavar os agregados a baridade diminuiu e aumentaram o número de vazios. Esse resultado é lógico, uma vez que ao se lavar o agregado retira-se partículas mais finas, e conseqüentemente aumenta o número de vazios, e naturalmente diminui a massa volúmica aparente.

Como observado anteriormente a amostra de RCD é muito similar à amostra de primeiro crivo obtida por RODRIGUES (2011) (Tabela 2.23), que encontrou baridade para esse agregado de 1383.0 kg/m<sup>3</sup>. Esse valor é maior que o encontrado neste trabalho experimental, mas isso se deve ao fato do agregado aqui estudado ter sua granulometria modificada ao passar por um peneiro de 2 mm. Sendo reduzida a variabilidade das dimensões dos grãos, as partículas se acomodam de maneira diferente de forma a restarem uma maior volume de vazios.

A teor de comparação, estão apresentados na Tabela 4.6 as baridade e volumes de vazios dos AFN utilizados neste trabalho.

Tabela 4.5: *Baridade e volume de vazios dos agregados naturais finos.*

Areia 0/2 mm	
$\rho_b$ - baridade (kg/m <sup>3</sup> );	1482.450
v - percentagem média de vazios (%);	42.54%
Areia 0/4 mm	
$\rho_b$ - baridade (kg/m <sup>3</sup> );	1540.397
v - percentagem média de vazios (%);	39.59%

Nota -se a diferença significativa que existe entre os valores de baridade dos agregados naturais finos e os agregados finos reciclados (Tabela 3.7, Tabela 3.8 e Tabela 4.6), os AFR apresentam baridades inferiores. Essa diferença deve-se à maior porosidade dos agregados reciclados, que faz com que existam mais irregularidades nas superfícies dos grãos e mais ar dentro entre partículas.

Neste trabalho, considera-se que a granulometria mais contínua dos AN, em comparação com os AFR, provoca uma diminuição do índice de vazios e então, um aumento da baridade, valores estes mais desejáveis para um agregado a ser utilizado em betões.

#### 4.1.4. Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica é uma propriedade essencial dos agregados, pois influencia a massa volúmica do betão e conseqüentemente a resistência mecânica. Na produção do betão as dosagens dos componentes são apresentadas em massa, e neste trabalho a composição referência foi baseada em uma percentagem volumétrica, dessa forma se fez necessário conhecer as massas volúmicas dos agregados reciclados a ser utilizados para o cálculo das composições das famílias de betão.

De acordo com o ensaio descrito na norma NP EN 1097-6, foram determinados os valores para a massa volúmica do material impermeável das partículas, a massa volúmica das partículas secas em estufa, a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca e a absorção de água dos AFR. A absorção de água provoca nos agregados um aumento em sua massa pela penetração de água no poros dos grãos. A absorção de água influencia de forma significativa na quantidade de água necessária na mistura, e pode modificar a relação a/c, alterando a trabalhabilidade, consistência e viabilidade. Segundo BRAVO (2016), a absorção de água dos materiais exerce forte influência no desempenho mecânico e a durabilidade do betão endurecido, pois o aumento dessa característica está relacionado com uma maior porosidade. Os resultados dos ensaios que determinaram a massa volúmica e absorção de água dos AFR estão apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.6: *Massa volúmica e absorção de água dos AFR não lavados.*

Agregados não lavados	
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m <sup>3</sup> )	2470.816
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m <sup>3</sup> )	2086.754
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m <sup>3</sup> )	2241.855
Absorção de água	7.43%

Tabela 4.7: *Massa volúmica e absorção de água dos AFR lavados.*

Agregados lavados	
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m <sup>3</sup> )	2509.991
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m <sup>3</sup> )	2224.687
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m <sup>3</sup> )	2338.106
Absorção de água	5.10%

Ao analisar os resultados (Tabela 4.7 e 4.8) nota-se que a lavagem dos agregados proporciona a diminuição dos finos na amostra e conseqüentemente absorção de água diminui, e aumenta a massa volúmica. Isso se deve ao fato que essas partículas eliminadas durante a lavagem são mais porosas, possuem mais ar nos poros e esses poros absorvem e acondicionam uma quantidade de água significativa. RODRIGUES (2011) observou que quanto maior for a diferença entre a massa volúmica seca e massa volúmica saturada, maior é a porosidade do agregado.

BRAVO (2016) afirma que a densidade dos materiais está relacionada com a qualidade dos agregados, uma vez que obteve melhor desempenho de betões produzidos com agregados que possuíam maior densidade. Assim sendo, a lavagem dos agregados faz com que estes se tornem mais adequados ao uso em betões.

Segundo BRAVO (2016), especificações que normatizam o uso de AR em betões em vários países exigem que a absorção de água dos AR não seja maior que 7%. Embora essas normas não se apliquem em todos os locais, certamente colocaria um percalço no uso dos AFR não lavados que foram utilizados neste trabalho. EVANGELISTA (2007) afirma que a massa volúmica seca dos agregados reciclados de origem em tijolos possuem valores entre 1750 e 2496 kg/m<sup>3</sup>, e os que possuem a origem em cerâmicos de louça sanitária, possuem massa volúmica seca entre 2310 e 2780 kg/m<sup>3</sup>. Esse estudo é um indicativo que os agregados neste trabalho estudados possuem origem em tijolos. KATHIB (2005), citado por PEDROZO (2008) encontrou o valor da absorção de 6,2% para agregados cerâmicos, e DEVENNY e KHALAF (199), citados por LEITE (2001) apresentaram taxas de absorção de agregados reciclados com origem em tijolos cerâmicos com variações entre 5 e 15%.

BRAVO (2016) em ensaios de determinação da massa volúmica em AFR obteve valores entre 2603.9 kg/m<sup>3</sup> e 2708.0 kg/m<sup>3</sup> para massa volúmica do material impermeável das partículas; entre 2581.4 kg/m<sup>3</sup> e 2634.0 kg/m<sup>3</sup> para massa volúmica das partículas secas em estufa; e entre 2591.2 kg/m<sup>3</sup> e 2661.0 kg/m<sup>3</sup> para massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca. O autor ainda encontrou o valores de 8.7% em média para a absorção de água dos AFR, e aponta que quanto maior a massa volúmica, menor a taxa de absorção, facto que se comprova nos resultados obtidos nesta pesquisa.

Em comparação com ROSA (2002), encontrou valores para a massa volúmica do material impermeável das partículas de 2682.7 kg/m<sup>3</sup>, massa volúmica das partículas secas em estufa de 2272.8 kg/m<sup>3</sup>, e massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca de 2029.21 kg/m<sup>3</sup>; concluindo que os AFR ensaios eram mais densos que os do presente estudo.

Em relação a EVANGELISTA (2007), que obteve massa volúmica do material impermeável das partículas de 2555.0 kg/m<sup>3</sup>, massa volúmica das partículas secas em estufa de 1913.0 kg/m<sup>3</sup>, e massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca de 2165.0 kg/m<sup>3</sup>, percebe-se que neste trabalho encontrou-se maior valor para a massa volúmica do material impermeável, e valores mais baixos para as outras propriedades.

Diferentes autores encontraram valores díspares no que se refere à característica da massa volúmica, tal fato deve-se à origem dos AFR, de diferentes centrais de reciclagem, e também às diferentes granulometrias das mostras estudadas, o que pode ser um indicativo que as maiores partículas dos RCD podem também ter um peso específico maior.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos na pesquisa de RODRIGUES (2011) em relação a massas volúmicas de AFR provenientes da SGR. Ao se comparar a amostra aqui analisada com a amostra SGR#1, que é a amostra de menor granulometria estudada por RODRIGUES (2011), verifica-se que os valores encontrados para SGR#1 são mais elevados que os encontrados para os AFR não lavados deste estudo. Isso deve-se ao fato de o ensaio de massa volúmica no presente trabalho, ser efetuado com material proveniente da passagem da amostra no peneiro de 2 mm, modificando-se assim a granulometria do material, enquanto a amostra SGR#1 de RODRIGUES (2016) varia de 0 – 20 mm. Dessa forma a amostra do presente trabalho perde as partículas maiores que, além de serem mais pesadas, fazem com que a melhor acomodação de grãos com granulometria mais extensa em um recipiente, influencie no resultado do ensaio, apontando uma massa volúmica maior.

Tabela 4.8: *Massas volúmicas e absorção de água das amostras da SGR.* (Adaptado de RODRIGUES, 2011).

<b>Amostra</b>	<b>Massa volúmica das partículas impermeáveis (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa volúmica seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa volúmica saturada com superfície seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>
SGR #1	2637.6	2320.8	2440.9
SGR #2	2647.1	2382.1	2482.2

RODRIGUES (2011) observa que a massa volúmica das amostras na sua pesquisa foi sempre maior que 2000 Kg/m<sup>3</sup>, valor que enquadra os agregados como massa normal

segundo a Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto. De acordo com essa classificação, os agregados estudados neste trabalho também podem ser caracterizados como agregados de massa volúmica normal. Para a absorção de água o autor encontrou taxa de 4.9% para a amostra do primeiro crivo da SGR. A remoção da fração acima de 2 mm no trabalho de RODRIGUES (2011) gerou aumento percentualmente a quantidade de finos presentes, aumentando também a taxa de absorção de água. Dessa forma é expectável que neste trabalho aqui desenvolvido ocorra também esse facto.

No trabalho de SILVA et al. (2014), citado por BRAVO (2016), foram analisadas características de AR provenientes de RCD de 236 trabalhos previamente realizado por outros autores, entre os anos de 1977 e 2014. A Figura 4.4 a seguir mostra a relação entre os resultados aqui encontrados e os resultados obtidos nessa compilação de dados.

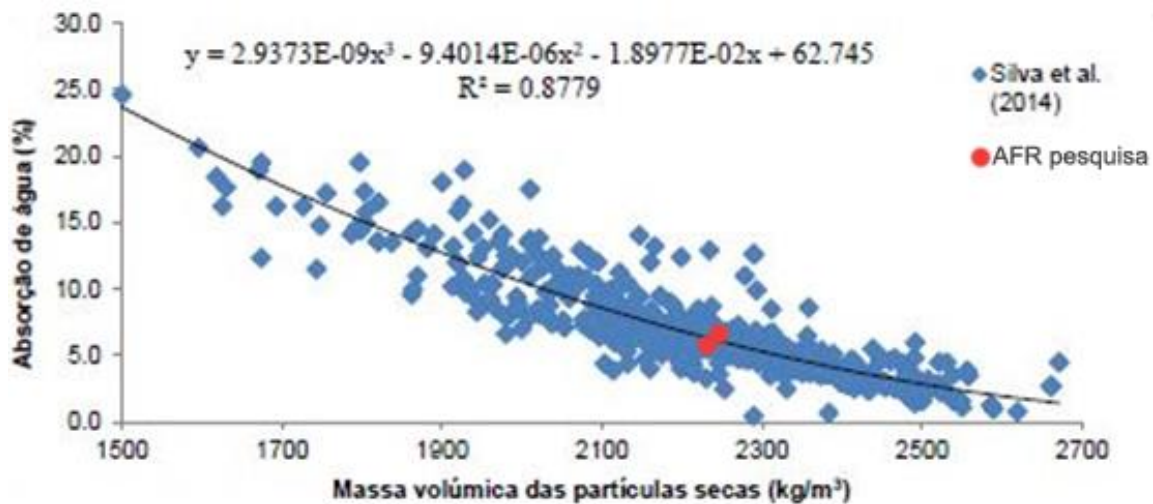


Figura 4.4 - Comparação entre a massa volúmica e a absorção de água dos AR.

É possível observar que os resultados obtidos encontram-se muito próximos à curva de tendência da relação entre absorção de água e massa volúmica seca.

Para se compreender a diferença das massas volúmicas e absorção de água dos diferentes tipos de agregado apresenta-se na Tabela 4.10 as propriedades dos AN que foram utilizados nas amassaduras.

Tabela 4.9: *Massas volúmicas de AN.*

<b>Amostra</b>	<b>Massa volúmica das partículas impermeáveis (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa volúmica seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa volúmica saturada com superfície seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
Areia 0/4 mm	2620.0	2550.0	2580.0	1.1
Areia 0/2 mm	2620.0	2580.0	2590.0	0.7

Pode-se observar que os AFR apresentam resultados que indicam um pior desempenho, nomeadamente uma massa volúmica menor, que os AN devido à alta porosidade característica desse material.

LEITE (2001) indica que nas menores frações dos agregados estão presentes partículas de cimento, o que pode contribuir para o aumento da taxa de absorção de água nos agregados não lavados, já que esse possuem frações de material inferiores a 0.063 mm.

Em comparação aos agregados naturais, os agregados reciclados vão precisar de uma maior quantidade de água até a saturação, quando comparando com os os agregados naturais devido à natureza da composição desses materiais. A maior taxa de absorção do AFR interfere na relação a/c da mistura de betão, e também altera a trabalhabilidade da mistura, o que pode deixar a massa do betão muito seca, sendo necessária a compensação com água.

RODRIGUES E FUCALÉ (2014) verificaram que os AFR apresentam absorção cerca de 10 vezes maior que os agregados finos naturais, e que a massa específica desse dos AFR é menor que dos AN, sendo inversamente proporcional à sua capacidade de absorção de água. EVANGELISTA (2007) afirma que agregados finos naturais possuem geralmente taxa de absorção de água inferior a 1%. Os agregados estudados neste trabalho apresentam taxas de absorção numa razão de 463% se comparados os AFR lavados à areia 0/4 mm; 675% se comparados os AFR não lavados à areia 0/4 mm; 728% se comparados os AFR lavados à areia 0/2 mm: e 1061% se comparados os AFR não lavados à areia 0/2 mm.

Neste capítulo, conclui-se que agregados provenientes de RCD apresentam-se com menor massa volúmica devido à sua composição, e à porosidade característica desse material, que faz com que o índice de vazios seja maior que o dos agregados naturais, o que faz com que os AR possuam também taxa de absorção de água maior que os AN.

## **4.2. Propriedade dos betões no estado endurecido**

### **4.2.1. Produção dos betões**

O processo de amassadura e produção dos betões levou em consideração os dados da amassadura de referência e posteriormente a utilização de diferentes percentagens de substituição de AFR e água de lavagem. Os elementos constituintes do betão primeiramente foram pesados e separados, as betonagens tiveram a duração de 10 minutos cada. Na betoneira foram colocados primeiro os agregados grossos (brita 2 e brita 1), e depois os agregados finos (primeiro a areia 0/4mm, depois a areia 0/2mm), e então quando utilizados, os AFR. Nesse ponto foi colocado cerca de 2/3 da água calculada para a amassadura. (EVANGELISTA, 2007) afirmou que betões produzidos dessa maneira, com os agregados submetidos a uma pré-molhagem, parcialmente saturados, apresentam maior densidade nas interfaces entre a pasta de cimento e os agregados em comparação com os produzidos com agregados pré-saturados. Em seguida foi colocado o cimento e o restante da água. O processo da colocação dos componentes dura em média 6 minutos e deixou a betoneira trabalhar por mais 4 minutos até a homogeneização da amassadura.

Após essa fase, foi realizado o ensaio de abaixamento da mistura, sendo o objetivo o resultado de 50-90 mm. A NP EN 12350-2 (2002) "Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento" foi a norma utilizada para medir o abaixamento da mistura, e consiste em encher com betão um molde troncocônico, aplicar 25 apiloadas em três camadas distintas, e após o levantamento cuidadoso do molde, a medição do abaixamento em relação à altura do cone.

Os moldes dos provetes foram previamente preparados, devidamente limpos e lubrificados com descofrante. Após o enchimento dos moldes, foi realizada a vibração com agulha vibratória, e utilizando uma colher de pedreiro a superfície foi regularizada. Passadas 24 horas os provetes foram retirados dos moldes com um compressor a ar, e colocados para curar em um reservatório de água. O processo de amassadura e enchimento dos moldes está representado na Figura 4.5 e Figura 4.6.



Figura 4.5 - Amassadura na betoneira.



Figura 4.6 - Enchimento dos moldes.

#### 4.2.2. Betão de referência

As diversas campanhas experimentais analisadas e as principais características definidas de cada família de betão foram baseadas no betão de referência. Para se atingir a trabalhabilidade desejada em diferentes composições, foi necessário eventualmente alterar as relações a/c de algumas amassaduras de betões com AFR.

A composição do betão de referência teve como base quantidades de referência encontradas na literatura da especialidade. Após a relação com os devidos pesos específicos dos materiais, foi possível encontrar a composição do betão de referência (Tabela 4.11).

Tabela 4.10: *Composição do BR.*

Amassadura	Água rede (L)	Cimento (Kg)	AN fino (Kg)	AN grosso (Kg)	AR lavado (Kg)	AR não lavado (Kg)	Brita 1 (Kg)	Brita 2 (Kg)	Água de lavagem (L)
A01 – BR	14.081	25.669	28.649	28.538	-	-	42.379	28.897	-

No ensaio de abaixamento do betão fresco no betão de referência foi medido o valor de 70 mm.

O ensaio para a determinação da resistência à compressão, foi realizado aos 7, 28 e 91 dias, de acordo com o procedimento descrito na NP EN 12390-3 (2009) “Ensaio ao betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”, ensaios

em provetes cúbicos de 150 x 150 x 150 mm. Os valores das tensões de rotura por compressão estão indicados no Anexo B, e os valores da resistência à compressão do betão de referência nas diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.11: Resistência à compressão do BR.

fcm,7 (MPa)			Desvio padrão
36.20	39.57	38.16	1.69
fcm,28 (MPa)			Desvio padrão
44.49	47.07	43.40	1.88
fcm,91 (MPa)			Desvio padrão
42.73	43.03	47.05	2.41

O valor de resistência à compressão médio para 7 dias é de 37.97 MPa; para 28 dias, 44.98 MPa; e para 91 dias, 44.27 MPa. A partir dos dados da Tabela 4.12 e da norma NP EN 206-1 é possível concluir que o betão de referência está classificado como C30/37, de acordo com a sua resistência à sua compressão.

O ensaio para a determinação da resistência à tração, foi realizado aos 7, 28 e 91 dias, de acordo com o procedimento descrito NP EN 12390-6 (2003) “Ensaio ao betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão dos provetes”, ensaios em provetes cilíndricos de 300 x 150 mm. Os valores das tensões de rotura por compressão diametral estão indicados no Anexo B, e os valores da resistência à tração do betão nas diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.12: Resistência à tração por compressão diametral do BR.

fct,7 (MPa)			Desvio padrão
2.59	3.19	-	0.43
fct,28 (MPa)			Desvio padrão
2.69	2.97	3.52	0.42
fct,91 (MPa)			Desvio padrão
3.04	3.77	-	0.52

O valor de resistência à tração médio para 7 dias é de 2.89 MPa; para 28 dias, 3.06 MPa; e para 91 dias, 3.41 MPa.

Os valores obtidos neste capítulos foram tomados como valores de referência para analisar o comportamento dos betões produzidos com AFR lavados e não lavados e com água de lavagem.

#### 4.2.3. Família 1

Para o fabrico da Família 1 (*com AFR não lavado*) levou-se em consideração os mesmos volumes dos componentes do betão de referência. Neste grupo procurou-se utilizar diferentes percentagens de substituição dos ANF por AFR não lavados, de dimensão até 2 mm, de forma a analisar ao fim dos ensaios o comportamento dos betões produzidos com esse agregados em específico. A composição das amassaduras componentes desta família estão apresentadas na Tabela 4.14.

Tabela 4.13: *Composição dos betões da Família 1.*

Amass.	% AFR	Água rede (L)	Cimento (Kg)	AN fino (Kg)	AN grosso (Kg)	AR lavado (Kg)	AR não lavado (Kg)	Brita 1 (Kg)	Brita 2 (Kg)	Água de lavagem (L)
A02	25%	13.961	25.669	21.486	21.404	-	11.497	42.379	28.897	-
A03	50%	13.840	25.669	14.324	14.269	-	22.993	42.379	28.897	-
A04	100%	13.600	25.669	0.000	0.000	-	45.987	42.379	28.897	-

Na Família 1 procurou-se substituir os agregados naturais finos, por ARF não lavado nas percentagens de 25% para a A02, 50% para a A03, e 100% para A04. Os valores de abaixamento do betão fresco foram respectivamente 65 mm para A02, 60 mm para A03 e, para o caso da amassadura A04 houve a necessidade de alterar-se a relação a/c, pois ao realizar o ensaio do assentamento verificou-se que o betão encontrava-se muito seco, sendo necessário adicionar 853 g de cimento e 2.049 L de água à mistura, sendo a relação a/c final de 0.60, obtendo-se um abaixamento de 60 mm. Esse facto leva a conclusão que o aumento da percentagem de substituição de AFR afeta a trabalhabilidade do betão, levando ao maior consumo de água na mistura, fazendo com que o betão fique mais seco.

Os valores das tensões de rotura por compressão dos provetes da Família 1 estão indicados no Anexo B, e os valores da resistência à compressão do betão nas diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.14: Resistência à compressão dos betões da Família 1.

Resistência à compressão Família 1						
Amassadura	fck,7 (MPa)			fcm,7 (MPa)	$\Delta$ med, 7 (%)	Desvio padrão
A01 - BR	36.20	39.57	38.16	37.97	-	1.69
A02	25.48	27.66	26.21	26.45	-30.36	1.11
A03	23.85	24.36	22.63	23.61	-37.81	0.89
A04	21.39	21.56	19.52	20.82	-45.16	1.13
	fck,28 (MPa)			fcm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 - BR	44.49	47.07	43.40	44.98	-	1.88
A02	35.11	35.35	32.31	34.26	-23.85	1.69
A03	31.17	29.11	28.88	29.72	-33.93	1.26
A04	27.80	28.67	27.48	27.98	-37.80	0.62
	fck,91 (MPa)			fcm,91 (MPa)	$\Delta$ med, 91 (%)	
A01 - BR	42.73	43.03	47.05	44.27	-	2.41
A02	44.84	39.07	41.01	41.64	-5.95	2.93
A03	36.78	36.60	34.72	36.03	-18.61	1.14
A04	31.03	26.55	27.64	28.41	-35.84	2.33

Pode-se perceber que em relação ao betão de referência, os betões produzidos na Família 1 apresentaram desempenho inferior. É perceptível que a medida que se aumenta a percentagem de substituição dos agregados naturais, caem os valores obtidos de resistência à compressão. A maior variação de valores verificada foi a de 0% de substituição para a de 25% de substituição, sendo 30.36% em média para ensaios realizados a 7 dias, e 23.85% em média aos 28 dias. Nota -se também que para os ensaios realizados aos 91 dias a diferença cai para apenas 5.95%. A segunda maior variação de valores apresentada proporcionalmente foi da substituição de 25% para quando se substitui 50%, com uma variação média de 2.84 MPa para 7 dias e 4.54 MPa para 28 dias. Já aos 91 dias, a maior variação é entre as substituições de 50% para 100%, nomeadamente de 7.62 MPa. O facto de que os valores de resistência diminuem mais entre a substituições menores de AFR leva a crer que o decréscimo da resistência do betão produzido com esses materiais não é linear conforme a parcela de substituição. É importante ressaltar que a amassadura A04 foi produzida com uma relação a/c de

0.60, enquanto as outras amassaduras tinha uma relação a/c de 0.50, e sabe-se que o aumento da relação a/c pode afetar a resistência dos betões.

À medida que o betão avança em idade a diferença de resistência à compressão apresentada diminui, uma vez que a variação média para os ensaios de 28 dias foi sempre menor que os resultados aos 7 dias de idade. A medida que o betão envelhece, aumenta a atividade pozolânica, que faz com que o betão ganhe mais resistência. O AFR utilizado nas amassaduras desse grupo ainda apresentam alto teor de finos como comprovado no ensaio do equivalente de areia. Essas partículas finas podem conter material proveniente de argamassas de cimento, o que faria com que existisse mais cimento na mistura do que o esperado.

A seguir, com base nos dados obtidos nas tabelas, realizou-se uma comparação dos valores de resistência à compressão em diferentes idades obtidos em diferentes amassaduras na Família 1 (Figura 4.7). O objetivo foi verificar como esses dados se relacionam e se existe alguma tendência nos valores encontrados.

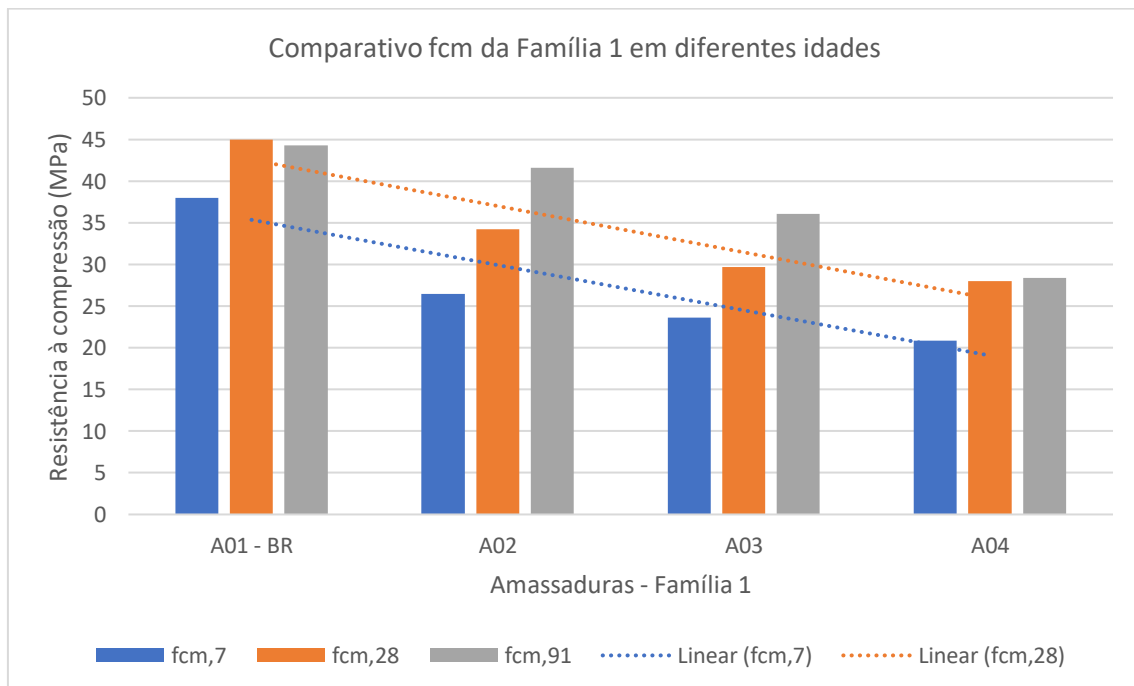


Figura 4.7 - Comparativo fcm da Família 1 em diferentes idades.

Ao analisar o gráfico da comparação dos valores de resistência das amassaduras a constatação de que há um decréscimo dessa propriedade fica evidente. Pode-se

perceber também que os valores não diminuem linearmente de acordo com as percentagens de substituição. Para comprovar esse facto calculou-se o coeficiente de correlação: -0.87 para 7 dias, -0.87 para 28 dias e -1.00 para 91 dias. Nota-se que existe uma grande correlação linear negativa entre a quantidade de AFR substituída nas misturas e a resistência à compressão. A reta de regressão dos resultados à compressão axial está apresentada no Anexo C.

Os valores das tensões de rotura por compressão diametral dos provetes da Família 1 estão indicados no Anexo B, e os valores da resistência à compressão diametral do betão nas diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.15: Resistência à tração por compressão diametral dos betões da Família 1.

Resistência à tração Família 1						
Amassadura	fct,7 (MPa)			fctm,7 (MPa)	$\Delta$ med, 7 (%)	Desvio padrão
A01 - BR	2.59	3.19	0.00	2.89	-	0.43
A02	3.13	2.78	0.00	2.95	2.20	0.25
A03	2.23	1.83	0.00	2.03	-29.82	0.28
A04	1.59	1.75	0.00	1.67	-42.31	0.11
	fct,28 (MPa)			fctm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 - BR	2.69	2.97	3.52	3.06	-	0.42
A02	1.94	2.58	2.73	2.42	-21.00	0.42
A03	2.52	2.41	2.59	2.51	-18.08	0.09
A04	1.49	1.95	1.87	1.77	-42.25	0.25
	fct,91 (MPa)			fctm,91 (MPa)	$\Delta$ med, 91 (%)	
A01 - BR	3.04	3.77	0.00	3.41	-	0.52
A02	2.21	2.71	0.00	2.46	-27.81	0.36
A03	3.38	2.26	0.00	2.82	-17.31	0.79
A04	2.21	2.08	0.00	2.14	-37.08	0.10

A rotura face ao ensaio de tração por compressão diametral foi sempre na interface entre a pasta de cimento e os agregados grossos, o que mostra que a resistência à tração desses betões será tão grande quanto a capacidade dessas zonas de resistir a esse esforço (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Provete rompido no ensaio de compressão diametral.

É possível constatar a partir dos dados apresentados que a medida que aumenta a percentagem de substituição de AFR nos betões, há uma diminuição da resistência à tração. Esta tendência também é verificada em outros trabalhos, BRAVO (2016) obteve uma média de 14.61% de redução para a substituição de 25% a 28 dias, 16.55% a 28 dias para a substituição de 50%, e 27.6% para substituição de 100% a 28 dias. Além do aumento da percentagem de substituição, um fator que explica a redução da resistência é composição dos AFR.

Com o objetivo de facilitar a comparação dos resultados, traçou-se o gráfico (Figura 4.9) que apresenta os resultados médios de resistência obtidos na família 1.

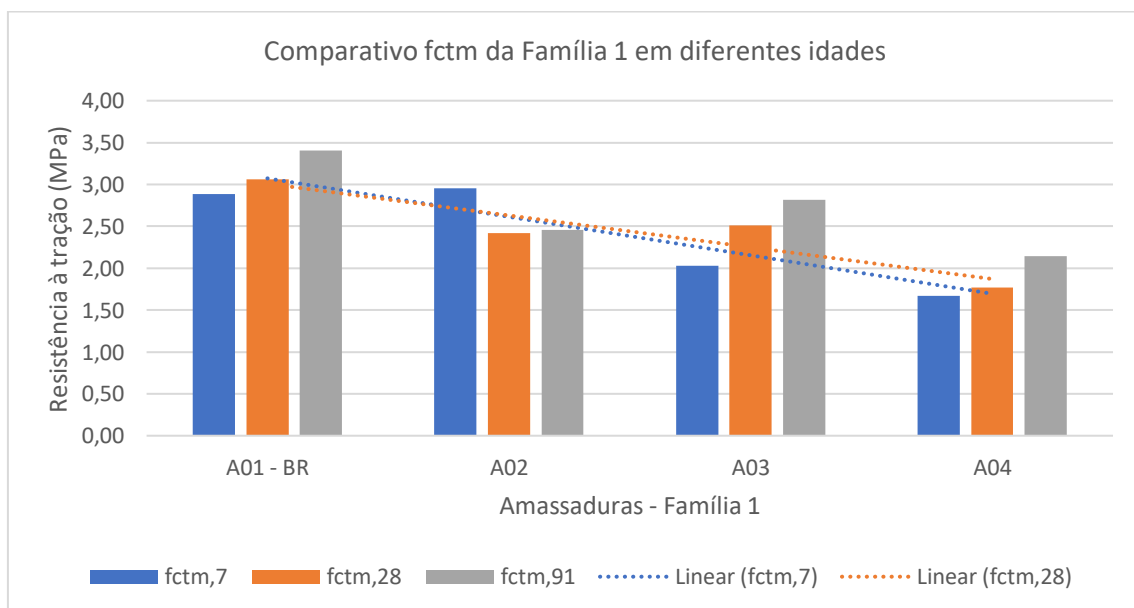


Figura 4.9 - Comparativo fctm da Família 1 em diferentes idades.

O gráfico baseado nos dados dos ensaios de resistência à tração evidenciam que há uma tendência de diminuição dos valores da propriedade para betões com percentagens maiores de substituição de AFR. Calculou-se o coeficiente de correlação: -0.92 para 7 dias, -0.95 para 28 dias e -0.82 para 91 dias. Nota-se que existe uma grande correlação linear negativa entre a quantidade de AFR substituída nas misturas e a resistência à tração, embora seja uma tendência menos evidente que à apresentada ao analisar a resistência à compressão. A reta de regressão dos resultados à tração por compressão diametral está apresentada no Anexo D.

#### 4.2.4. Família 2

Para o fabrico da Família 2 (ARF sujeitos a lavagem e utilização de água de amassadura proveniente da rede pública) foi considerado os mesmos volumes dos componentes do betão de referência. Aqui procurou-se utilizar percentagens de substituição dos ANF por AFR lavados, de 25%, 50% e 100%, de dimensão de 0.063 mm até 2 mm, de forma a analisar ao fim dos ensaios o comportamento dos betões produzidos com esse material. A composição das amassaduras componentes desta família estão apresentadas na Tabela 4.17.

Tabela 4.16: *Composição dos betões da Família 2.*

Amass.	% AFR	Água rede (L)	Cimento (Kg)	AN fino (Kg)	AN grosso (Kg)	AR lavado (Kg)	AR não lavado (Kg)	Brita 1 (Kg)	Brita 2 (Kg)	Água de lavagem (L)
A05	25%	13.958	25.669	21.486	21.404	12.257	-	42.379	28.897	-
A06	50%	13.836	25.669	14.324	14.269	24.513	-	42.379	28.897	-
A07	100%	13.591	25.669	-	-	49.026	-	42.379	28.897	-

A amassadura A05 apresenta 25% de substituição dos AN por AFR lavados, a A06, 50% de substituição e a A07, substituição total dos agregados. Para essas amassaduras conseguiu-se manter sempre os valores de relação a/c fixados em 0.50. A amassadura A05 teve o valor de abaixamento de 75mm, a A06 o valor de 65 mm, e a A07 de 60mm. Pode-se observar que a medida que aumentava a quantidade de AFR, o teste de abaixamento apresentava valores mais baixos, pois esses agregados possuem valores de taxa de absorção de água mais elevados, e apesar da compensação ter sido feita na quantidade de água na amassadura, os cálculos podem não se mostrar precisos.

Os valores das tensões de rotura por compressão dos provetes da Família 2 estão indicados no Anexo B, e os valores da resistência à compressão diametral do betão nas diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.17: Resistência à compressão dos betões da Família 2.

Resistência à compressão Família 2						
Amassadura	fck,7 (MPa)			fcm,7 (MPa)	$\Delta$ med, 7 (%)	Desvio padrão
A01 – BR	36.20	39.57	38.16	37.97	-	1.69
A05	32.01	33.07	28.59	31.23	-17.77	2.34
A06	27.97	30.04	29.10	29.04	-23.54	1.03
A07	25.04	21.14	20.71	22.30	-41.28	2.38
	fck,28 (MPa)			fcm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 – BR	44.49	47.07	43.40	44.98	-	1.88
A05	36.99	37.78	39.42	38.07	-15.38	1.24
A06	36.40	36.43	34.17	35.67	-20.72	1.30
A07	30.27	34.66	30.40	31.78	-29.36	2.50
	fck,91 (MPa)			fcm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 – BR	42.73	43.03	47.05	44.27	-	2.41
A05	42.04	39.00	36.44	39.16	-11.55	2.81
A06	36.85	38.01	38.29	37.72	-14.81	0.76
A07	34.53	31.46	31.45	32.48	-26.63	1.78

Ao analisar os valores da tabela percebe-se que os betões desta família apresentaram um desempenho inferior em relação ao betão de referência, pode-se ainda apontar que o desempenho piorou conforme houve o aumento da percentagem de substituição dos AFR lavados. É notável o facto de que conforme o betão avança a idade de cura, cai a diferença obtida para os valores de resistência à compressão em relação ao BR em todos os casos estudados. A maior variação proporcional verificada foi em relação ao BR e o A05, sendo que a substituição de 25% dos agregados finos fez com que os betões perdessem em média 17.77% de resistência à compressão em 7 dias, e 15.38% em 28 dias.

Para se comparar os resultados traçou-se o gráfico apresentado na Figura 4.10.

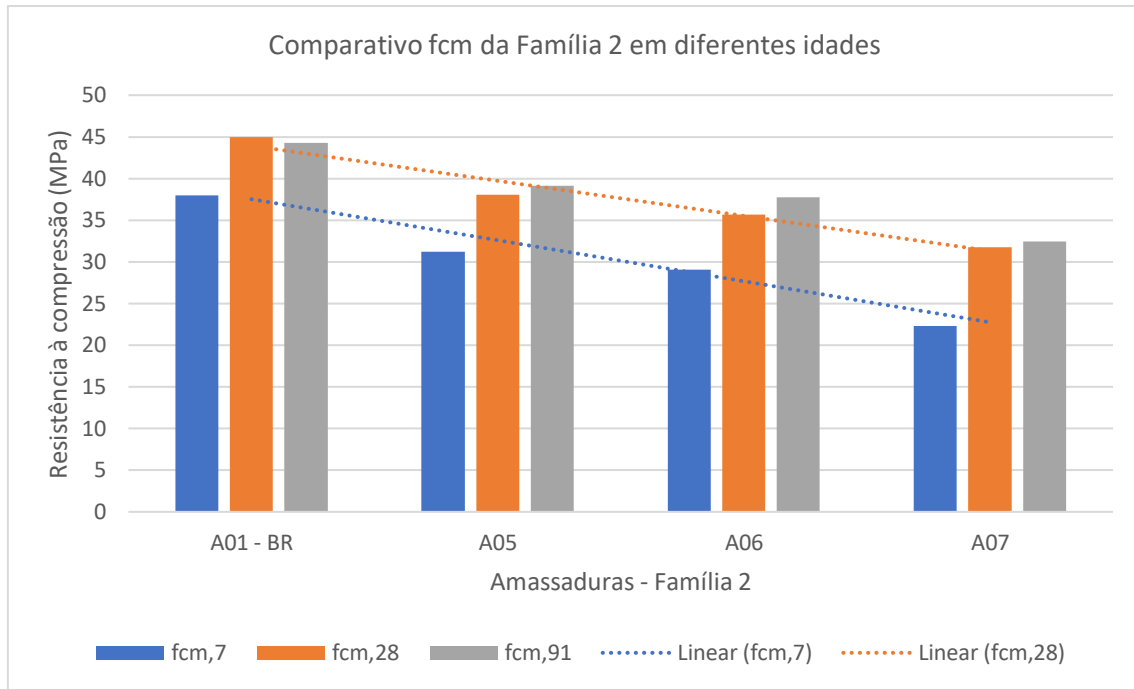


Figura 4.10 - Comparativo fcm da Família 2 em diferentes idades.

De acordo com o gráfico nota-se que os resultados apresentam uma tendência, mas que mais uma vez, ela não é linear. O impacto causado pelo uso de AFR lavados nas amassaduras não é diretamente proporcional à sua percentagem de incorporação. Para comprovar esse facto calculou-se o coeficiente de correlação: -0.98 para 7 dias, -0.94 para 28 dias e -1.98 para 91 dias. Novamente, como na Família 1, existe uma grande correlação linear negativa entre a quantidade de AFR substituída nas misturas e a resistência à compressão. A reta de regressão dos resultados à compressão axial está apresentada no Anexo C.

No intuito de se comparar isoladamente os efeitos da lavagem dos agregados reciclados presentes nas composições dos betões traçou-se o gráfico apresentado na Figura 4.11.

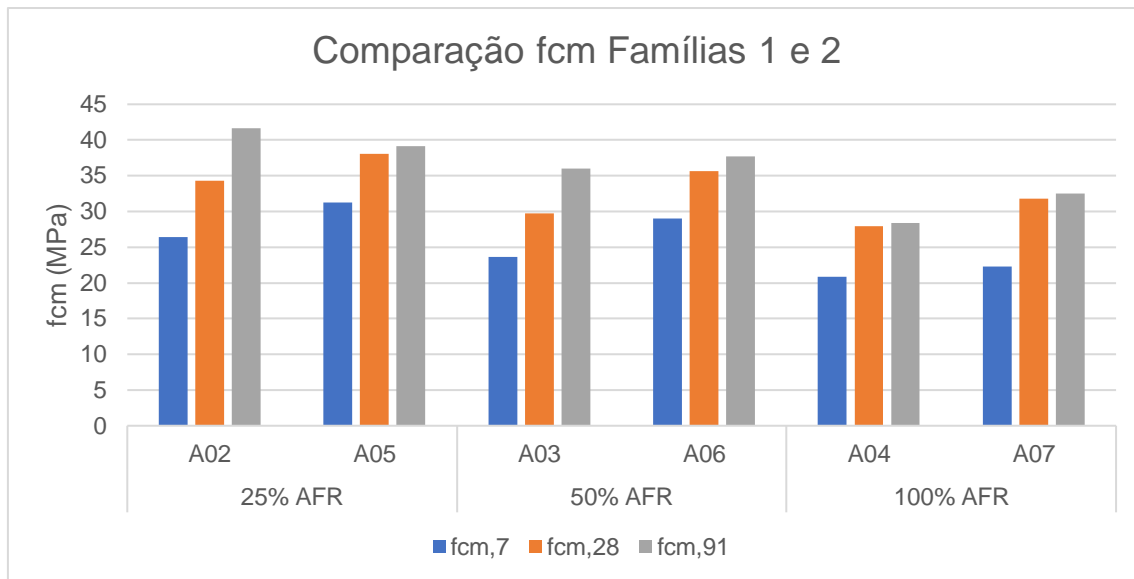


Figura 4.11 - Comparativo fcm das Família 1 e 2.

Comparando os resultados obtidos para a resistência a compressão das Famílias 1 e 2 (Figura 4.1) observa-se a diferença que que a lavagem dos AFR acarreta. Pode-se perceber que os resultados das amassaduras da Família 2 sempre foram maiores que os resultados da Família 1, em relação ao mesmo tempo de cura e à mesma percentagem de substituição de AFR. Os AFR não lavados, utilizados no fabrico da Família 1, possuem maior quantidade de finos como já apresentado anteriormente, e conseqüentemente mais argilas e contaminantes. Essas partículas proporcionam efeitos negativos no comportamento dos betões. Nota-se que há uma maior variação também nos resultados obtidos para 28 dias de idade dos provetes.

Os valores das tensões de rotura por compressão diametral dos provetes da Família 2 estão indicados no Anexo B, e os valores da resistência à tração por compressão diametral do betão nas diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.18: Resistência à tração por compressão diametral dos betões da Família 2.

Resistência à tração Família 2						
Amassadura	fct,7 (MPa)			fctm,7 (MPa)	$\Delta$ med, 7 (%)	Desvio padrão
A01 – BR	2.59	3.19	0.00	2.89	-	0.43
A05	2.83	2.96	0.00	2.89	0.17	0.09
A06	2.03	2.77	0.00	2.40	-16.87	0.52
A07	1.41	1.30	0.00	1.36	-52.94	0.08
	fct,28 (MPa)			fctm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 – BR	2.69	2.97	3.52	3.06	-	0.42
A05	2.69	3.11	2.89	2.90	-5.39	0.21
A06	2.44	2.25	2.77	2.49	-18.86	0.26
A07	2.08	2.37	2.67	2.37	-22.46	0.30
	fct,91 (MPa)			fctm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 – BR	3.04	3.77	0.00	3.41	-	0.52
A05	1.72	3.67	0.00	2.70	-20.94	1.38
A06	3.47	3.39	0.00	3.43	0.68	0.06
A07	3.09	2.52	0.00	2.80	-17.80	0.41

Constatou-se a partir dos dados da tabela que conforme aumenta a percentagem de substituição de AFR nos betões, em geral há uma diminuição da resistência à tração. Isso se deve à composição dos AFR, que embora lavados, ainda possuem partículas oriundas de outros materiais que não areias, nomeadamente terra, madeira, poliestireno expandido, entre outros materiais. Calculou-se o coeficiente de correlação: -0.96 para 7 dias, -0.93 para 28 dias e -0.41 para 91 dias. Nota-se que existe uma grande correlação linear negativa entre a quantidade de AFR substituída nas misturas para 7 e 28 dias, e que embora haja correlação negativa para 91 dias de idade, ela não é tão evidente, facto justificado pelo resultado inesperado da A06. A reta de regressão dos resultados à tração por compressão diametral está apresentada no Anexo D.

Para ilustrar a comparação de resultados traçou-se o gráfico apresentado na Figura 4.12.

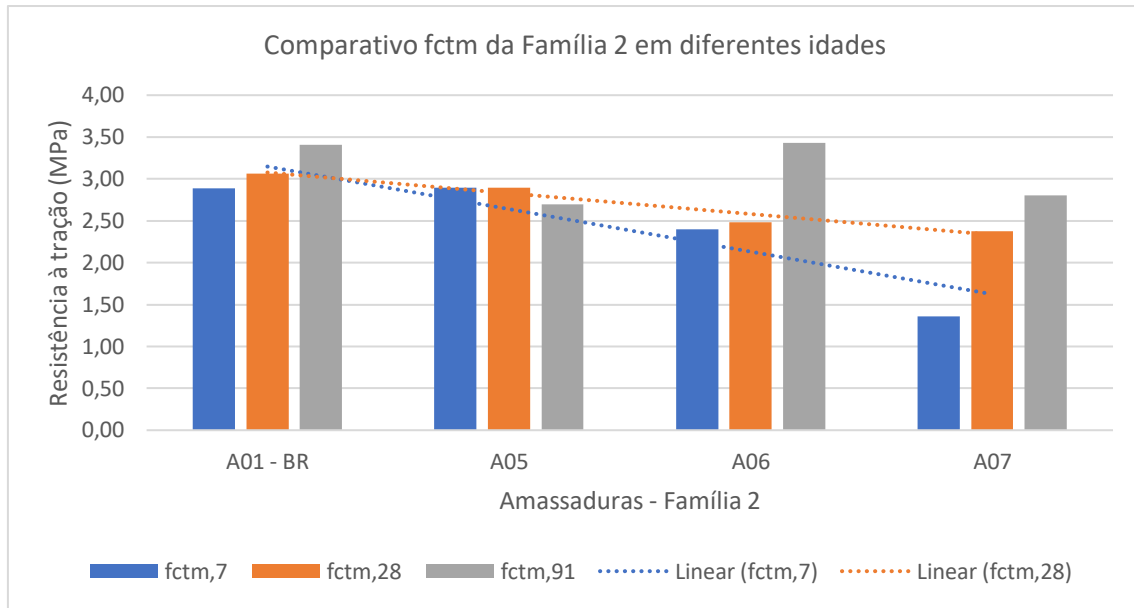


Figura 4.12 - Comparativo fctm da Família 2 em diferentes idades.

É interessante destacar que o resultado médio da amassadura A05 para 7 dias foi maior que o da amassadura de referência para o mesmo período, da mesma forma que o corrido na Família 1, não se encontra explicações para esse facto. É de realçar que se realizou ensaios em apenas 2 provetes para cada amassadura na idade de 7 dias, a baixa amostragem pode reduzir a fiabilidade dos dados.

Para se comparar isoladamente os efeitos da lavagem dos agregados reciclados presentes nas composições dos betões na resistência à tração, traçou-se o gráfico apresentado na Figura 4.13.

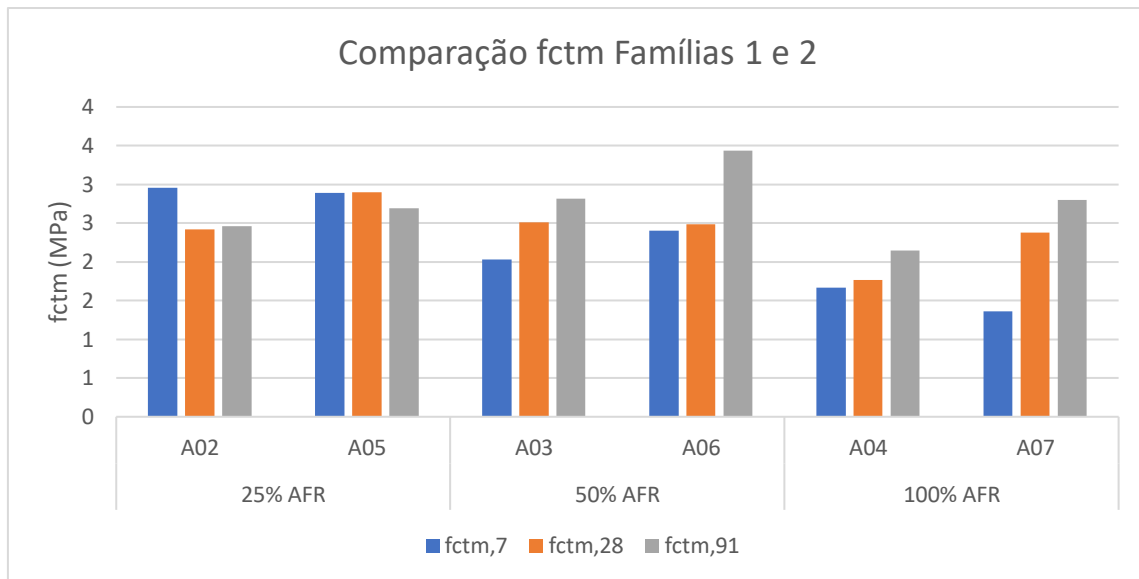


Figura 4.13 - Comparativo fctm das Família 1 e 2.

Comparando-se as resistências à tração obtidas ao ensaiar as Famílias 1 e 2, observa-se que em geral, a Família 2 obteve melhores resultados. Para percentagens de substituição de 25% de AFR, os resultados para idade de 7 dias foram muito similares, porém para 28 dias, a família produzida com agregados reciclados lavados apresentando desempenho significativamente superior. Para os ensaios de 28 dias, a Família 2 apresentou valores de resistência mais altos, embora não tenha sido notada grande evolução com a idade do betão. Para 100% de substituição, embora a Família 1 tenha apresentado valor médio mais alto para 7 dias, não se encontra explicação para esse facto, a não ser qualquer erro experimental que possa ter ocorrido.

Segundo NEVILLE (1995) citado por BRAVO (2016) a redução de valores de resistência à tração deve-se em parte devido à má qualidade da pasta formada pelo cimento e pelos AFR, que é primordial no desempenho dessa característica. Dessa forma é possível observar que além da quantidade de finos, a composição dos AFR é importante no desempenho mecânico dos betões.

#### 4.2.5. Família 3

Na produção dos betões da Família 3 foi utilizado os mesmos volumes dos componentes do betão de referência. Aqui procurou-se utilizar diferentes percentagens de substituição dos ANF por AFR lavados na ordem dos 0%, 25%, 50% e 100%, e substituição de água da rede por água utilizada previamente na lavagem dos agregados reciclados finos com

o período de decantação de 1 dia, de forma a analisar ao fim dos ensaios o comportamento dos betões produzidos com essa variação. A composição das amassaduras componentes desta família estão apresentadas na Tabela 4.21.

Tabela 4.19: *Composição dos betões da Família 3.*

Amass.	% AFR	Água rede (L)	Cimento (Kg)	AN fino (Kg)	AN grosso (Kg)	AR lavado (Kg)	AR não lavado (Kg)	Brita 1 (Kg)	Brita 2 (Kg)	Água de lavagem (L)
A08	-	-	25.669	28.649	28.538	-	-	42.379	28.897	14.081
A09	25%	-	25.669	21.486	21.404	12.257	-	42.379	28.897	13.958
A10	50%	-	25.669	14.324	14.269	24.513	-	42.379	28.897	13.836
A11	100%	-	25.669	-	-	49.026	-	42.379	28.897	13.591

Uma característica da amassadura A08 é que ela possui basicamente a mesma composição do betão de referência, tendo apenas substituída a água da rede por água de lavagem dos agregados reciclados, sendo assim possível isolar o efeito da incorporação desse componente.

As outras amassaduras desta família apresentaram diferentes percentagens de substituição de AFR lavados, sempre com o uso de 100% da água de lavagem nas amassaduras. Para a amassadura A11 foi necessário modificar a relação a/c, de forma a adequar a trabalhabilidade do betão fresco que havia se apresentando muito seco durante a produção. A amassadura A08 apresentou abaixamento no ensaio para medir a trabalhabilidade de 90 mm, a A09 abaixamento medido de 65 mm, a A10 de 6.5mm, e a A11 após um acréscimo de 853 g de cimento e 2.049 L de água que modificou a relação a/c para 0.60, o assentamento medido foi 60 mm.

Os valores das tensões de rotura por compressão dos provetes da Família 3 estão indicados no Anexo B, e os valores da resistência à compressão diametral do betão nas diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.20: Resistência à compressão dos betões da Família 3.

Resistência à compressão Família 3						
Amassadura	fck,7 (MPa)			fcm,7 (MPa)	$\Delta$ med, 7 (%)	Desvio padrão
A01 - BR	36.20	39.57	38.16	37.97	-	1.69
A08	32.94	32.19	32.98	32.71	-13.88	0.45
A09	32.01	23.13	30.08	28.41	-25.19	4.67
A10	26.78	26.60	26.88	26.75	-29.56	0.14
A11	20.72	20.33	21.13	20.73	-45.42	0.40
	fck,28 (MPa)			fcm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 - BR	44.49	47.07	43.40	44.98	-	1.88
A08	41.40	41.56	34.66	39.21	-12.84	3.94
A09	36.80	36.12	37.79	36.90	-17.96	0.84
A10	32.48	34.21	32.97	33.22	-26.15	0.89
A11	27.92	27.38	28.12	27.80	-38.19	0.38
	fck,91 (MPa)			fcm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 - BR	42.73	43.03	47.05	44.27	-	2.41
A08	47.15	47.45	43.83	46.14	4.22	2.01
A09	40.92	34.96	40.48	38.79	-12.39	3.32
A10	38.12	30.11	33.20	33.81	-23.63	4.04
A11	30.30	33.64	30.13	31.36	-29.17	1.98

Percebe-se que houve um decréscimo dos valores de resistência à compressão obtidos à medida que aumentou-se a percentagem de substituição de AFR lavado. A Família 3 em geral apresentou pior desempenho que a Família 2, porém melhor desempenho que a Família 1.

Em relação à Família 1, é expectável que os agregados reciclados lavados apresentam melhores resultados que os não lavados, pois a lavagem elimina praticamente toda a parcela de finos que é prejudicial ao desempenho do betão. Mesmo com o uso da água de lavagem, a Família 3 continuou a apresentar melhores resultados, o que indica que o período de decantação de 1 dia possibilitou eliminar dessa água uma parcela dos finos e contaminantes presentes nos AFR iniciais, caso contrário esta família apresentaria desempenho muito mais próximo do grupo anteriormente citado.

Em relação à Família 2, observa-se que o uso da água de lavagem na composição dos betões piora ligeiramente o desempenho. A quantidade de finos e partículas nocivas na água com período de decantação de 1 dia ainda prejudica o desempenho betão, uma solução para isso seria aumentar o período de decantação, ou realizar tratamentos específicos nesta água.

Para a amassadura A09, observa-se que um ensaio apresentou um resultado abaixo do desvio padrão, e que pode haver algum erro no ensaio realizado ou na execução daquele provete em específico.

Para ilustrar a comparação de resultados traçou-se o gráfico apresentado na Figura 4.14.

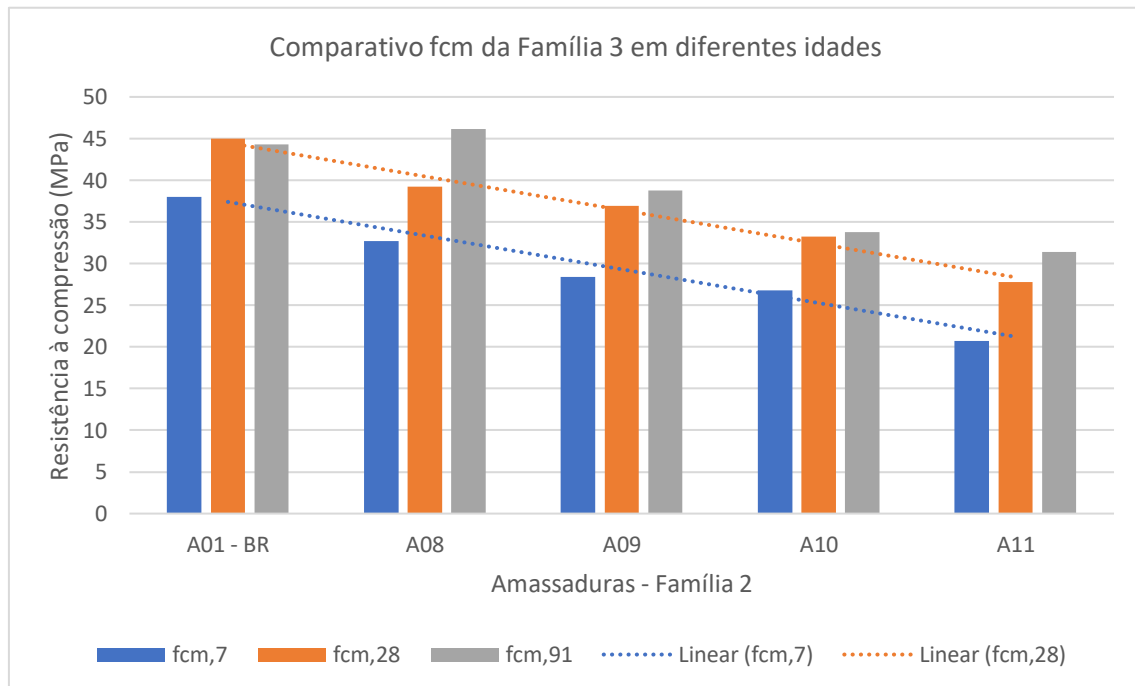


Figura 4.14 - Comparativo fcm da Família 3 em diferentes idades.

Observa-se novamente uma tendência de redução das resistências conforme aumenta a percentagem de substituição de AFR, da mesma maneira que foi apontado nas famílias anteriormente analisadas. Calculou-se o coeficiente de correlação: -0.99 para 7 dias, -1.00 para 28 dias e -0.92 para 91 dias. Nota-se que existe uma grande correlação linear negativa entre a quantidade de AFR substituída nas misturas e a resistência à compressão. A reta de regressão dos resultados à compressão axial está apresentada no Anexo C.

A Figura 4.15 apresenta as diferenças de desempenho de acordo com as percentagens de substituição e idades de cura dos provetes das Famílias 2 e 3.

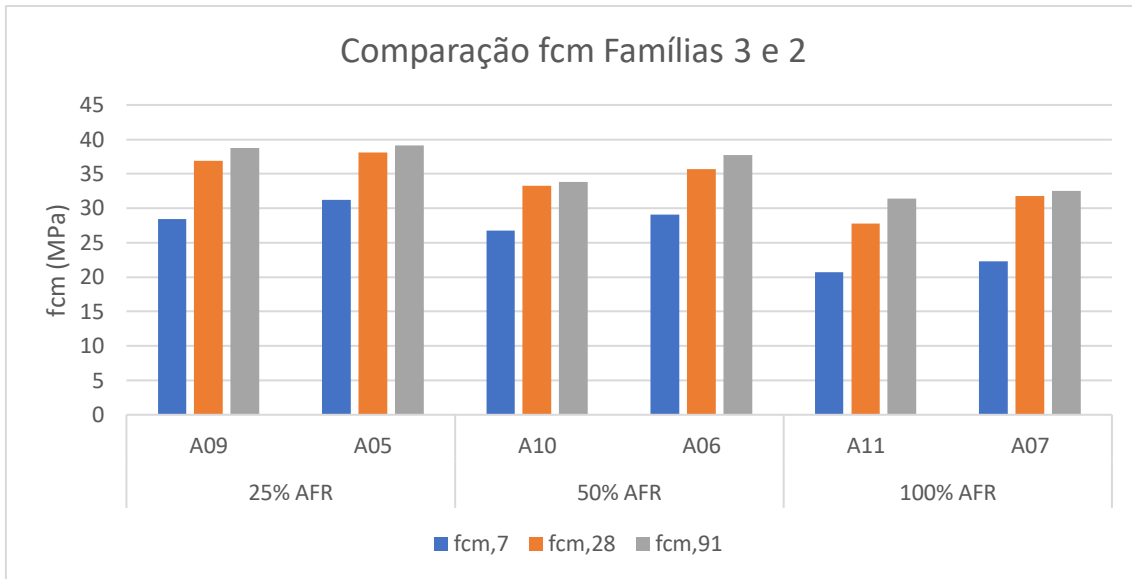


Figura 4.15 - Comparativo fcm das Família 3 e 2.

A Figura 4.16 mostra isoladamente os efeitos da incorporação da água de lavagem dos agregados reciclados presentes nas composições dos betões na resistência à compressão.

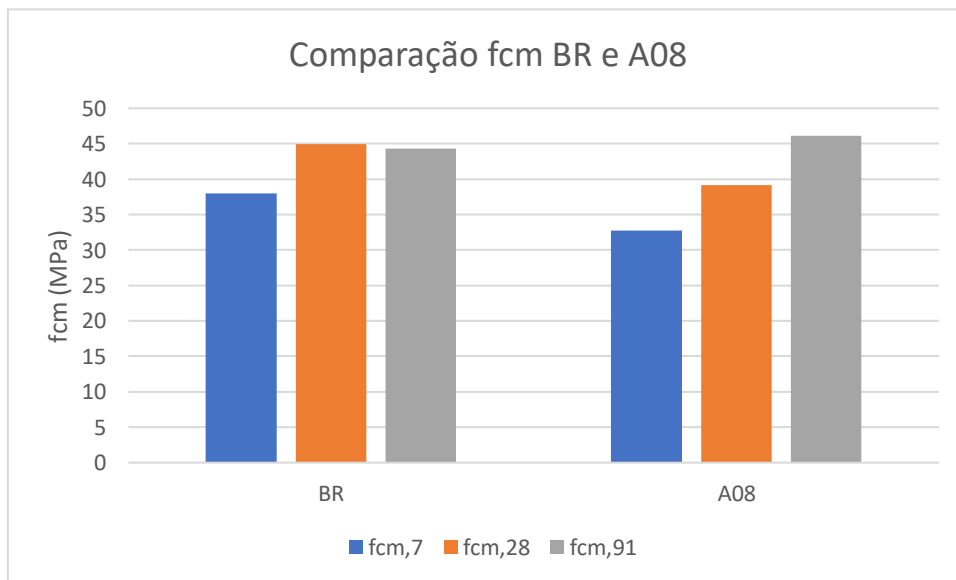


Figura 4.16 - Comparativo fcm BR e A08.

Ao comparar as amassaduras A08 e o BR, obtém-se informações referentes à influência isolada do uso de água de lavagem nas amassaduras de betões. O BR apresentou média de valor de resistência à compressão de 37.97 MPa para 7 dias de idade e 44.98 MPa para 28 dias, enquanto a A08 apresentou para 7 dias média de 32.71 MPa e para 28 dias 39.21 MPa. Houve uma redução de 12.84% da resistência encontrada para 28 dias, o facto pode ser explicado por esta água de lavagem carregar em sua composição matéria orgânica nociva ao desempenho do betão, partículas finas, argilas e contaminantes que podem ter efeitos negativos nas propriedades mecânicas. Era esperado que o betão de referência aos 91 dias apresentasse valores de resistência maiores que a amassadura A08, os resultados apresentaram o contrário. Esse facto pode ser explicado devido a alguma anormalidade nos ensaios realizados no BR aos 91 dias. Embora o betão produzido com a composição A08 apresente em geral pior desempenho que o BR, ao se levar em consideração o fator ambiental pode-se considerar o resultado positivo, dada a poupança de água potável que é proporcionada com o uso da água de lavagem na amassadura.

Os valores das tensões de rotura por compressão diametral dos provetes da Família 2 estão indicados no Anexo B, e os valores da resistência à tração por compressão diametral do betão nas diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.21: Resistência à tração por compressão diametral dos betões da Família 3.

Resistência à tração Família 3						
Amassadura	fct,7 (MPa)			fctm,7 (MPa)	$\Delta$ med, 7 (%)	Desvio padrão
A01 – BR	2.59	3.19	0.00	2.89	-	0.43
A08	3.18	3.35	0.00	3.26	12.93	0.12
A09	1.93	2.72	0.00	2.33	-19.49	0.56
A10	2.58	1.97	0.00	2.28	-21.20	0.43
A11	1.86	1.03	0.00	1.45	-49.95	0.59
	fct,28 (MPa)			fctm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 – BR	2.69	2.97	3.52	3.06	-	0.42
A08	3.11	3.25	3.87	3.41	11.39	0.40
A09	2.80	3.54	3.49	3.28	6.93	0.41
A10	2.76	2.48	2.91	2.72	-11.27	0.22
A11	2.25	2.28	2.41	2.31	-24.53	0.08
	fct,91 (MPa)			fctm,28 (MPa)	$\Delta$ med, 28 (%)	
A01 – BR	3.04	3.77	0.00	3.41	-	0.52
A08	3.32	2.33	0.00	2.82	-17.14	0.70
A09	2.87	3.21	0.00	3.04	-10.79	0.24
A10	3.26	3.33	0.00	3.30	-3.28	0.05
A11	2.61	1.27	0.00	1.94	-42.95	0.95

LEITE (2001) apresenta a hipótese que a resistência à tração ser influenciada por mecanismos de aderência física entre partículas, a aderência entre o betão e a superfície dos agregados acontece de maneira mais fácil quando os materiais da mistura são mais irregulares e mais rugosos, pois há um aumento da área da superfície e um maior entrelaçamento dos compostos de hidratação com os poros dos agregados. Dessa forma seria de se esperar um melhor comportamento dos betões produzidos com AFR. Contudo, verifica-se nos resultados apresentados que a medida que avança a idade do provete a diferença para o BR diminui, e em alguns casos houve até um melhor desempenho do betão produzido com água de amassadura do AFR lavado.

Na Figura 4.17 pode-se observar a comparação de resultados na família 3 para a resistência à tração por compressão diametral..

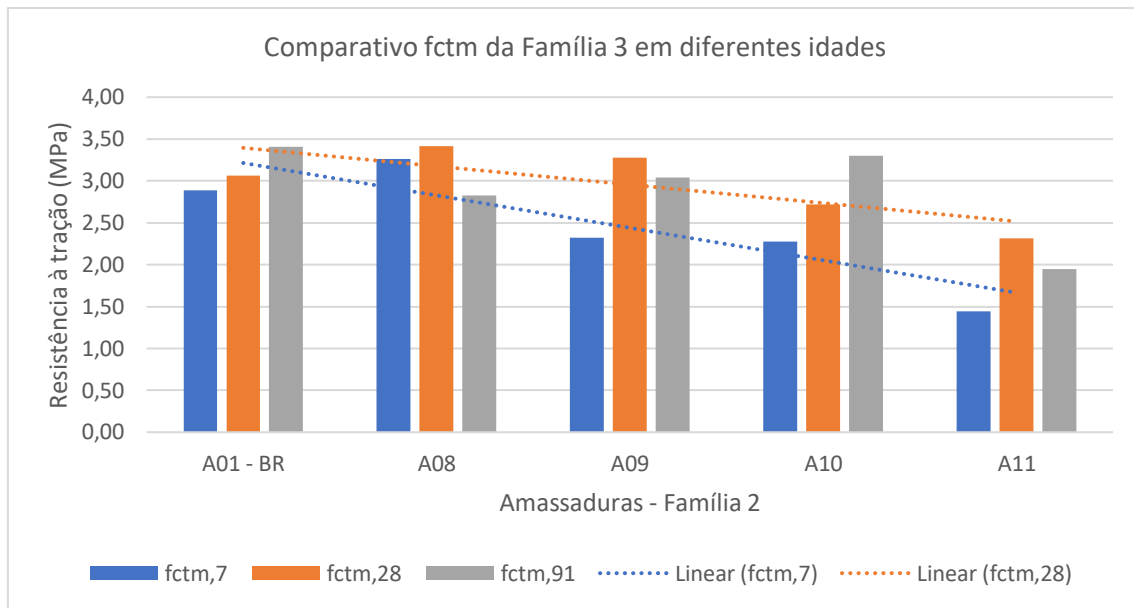


Figura 4.17 – Comparativo fctm da Família 3.

Calculou-se o coeficiente de correlação: -0.95 para 7 dias, -0.98 para 28 dias e -0.67 para 91 dias. Nota-se que existe uma grande correlação linear negativa entre a quantidade de AFR substituída nas misturas e a resistência à tração para as idades de 7 e 28 dias, e que essa relação é menor aos 91 dias. A reta de regressão dos resultados à tração por compressão diametral está apresentada no Anexo D.

Segundo BRITO et al (2005), citados por BRAVO (2016) a argamassa aderida aos grãos, a origem dos compostos de agregados reciclados e a necessidade do aumento da relação a/c têm um impacto negativo na resistência à tração.

Percebe-se que há uma tendência a redução da resistência à tração com o aumento da percentagem de substituição dos AFR, porém notou-se um ganho de resistência maior que o betão de referência em betões de mesma amassadura em diferentes idades. A Figura 4.18 apresenta uma comparação entre amassaduras produzidas com AFR lavados (Família 2) com amassaduras produzidas com AFR lavado e água de lavagem (Família3).

De notar que a Família 3, em geral apresentou melhores resultados de resistência à tração no ensaio de compressão diametral que a Família 2 para os betões de 28 dias de idade. Excepcionalmente a Família 3 teve pior performance para 100% de substituição de agregados finos.

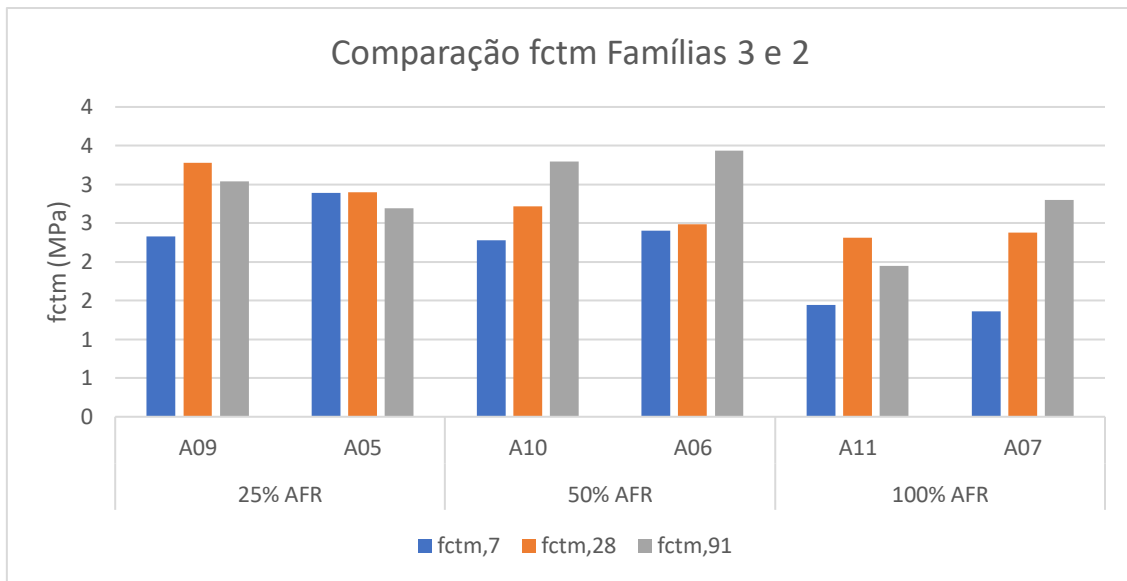


Figura 4.18 - Comparativo fctm das Família 3 e 2.

Na Figura 4.19 pode-se observar isoladamente os efeitos da incorporação da água de lavagem dos agregados reciclados presentes nas composições dos betões na resistência à tração por compressão diametral, entre o BR e a amassadura A08.

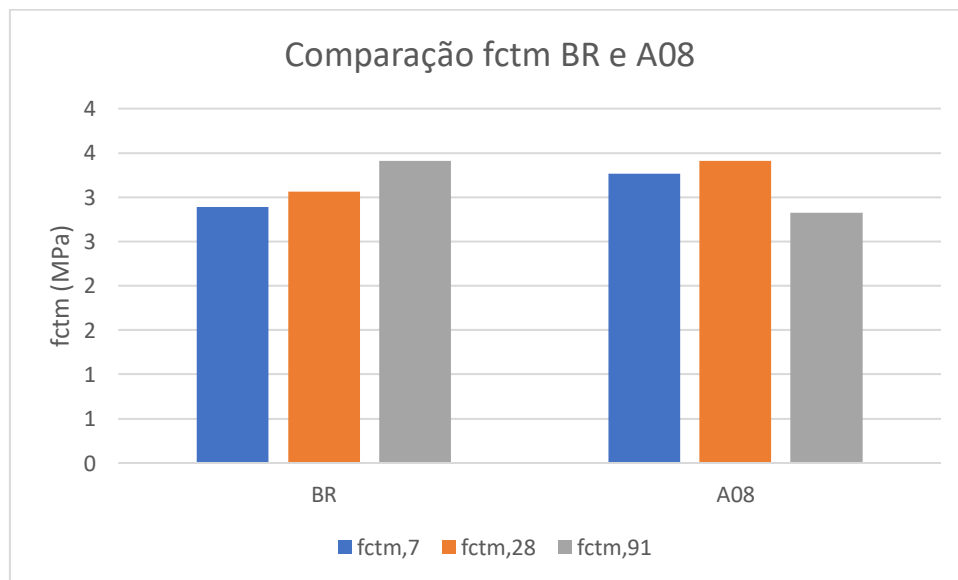


Figura 4.19 - Comparativo fctm BR e A08.

É possível observar que a amassadura A08, produzida com o água de lavagem dos AFR apresentou um desempenho superior que o betão de referência nos casos

observados. É correto afirmar que o uso da água de lavagem aumentou a resistência à compressão. É possível que haja algum composto na água de lavagem que provoque esse fenómeno, no entanto por falta de dados relativos a água de lavagem, e sua composição química não pode-se concluir com objetividade a análise.

## 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 5.1. Considerações finais

O estudo dos agregados finos reciclados (AFR) provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) como uma alternativa aos agregados finos naturais (AFN) na produção de betões possibilitou o conhecimento de várias características e parâmetros desses mesmos materiais e do comportamento mecânico dos betões no estado endurecido. Além do estudo dos AFR foi também analisado o desempenho de betões produzidos com AFR e com a água de lavagem desses AFR, com o intuito de diminuir o impacto causado pela lavagem desses materiais.

O agregado fino reciclado revelou-se fisicamente semelhante ao agregado natural, em termos granulométricos, entretanto as diferenças na massa específica, taxa de absorção, teor de finos e presença de argilas acabaram por influenciar negativamente no desempenho de betões produzidos com substituição de AN por AFR.

Foi observado que os RCD possuem uma granulometria mais extensa que os AN, dessa forma foi realizada uma correção granulométrica dos AFR antes de estes serem usados nas misturas, uma vez que esse processo possibilitou uma distribuição mais contínua da granulometria, e aproximando as características desse material às dos AN.

Pôde-se observar que os ARF apresentaram taxa de absorção maior em relação aos AN, devido à maior porosidade dos grãos. Devido a absorção de água dos AFR foi notado que esses materiais causaram uma redução da fluidez e perda de trabalhabilidade das argamassas dos betões, o que tornou mais difícil a moldagem dos provetes, sendo necessário sempre a compensação da água nas misturas e, em alguns casos, a alteração da relação a/c. É possível que um método de controle dessa trabalhabilidade quando utilizados os AFR tornaria o material mais atrativo para o uso em betões.

Verificou-se que os AFR apresentaram sempre baridade e massa volúmica menor que os AN, desta forma são considerados materiais com piores desempenhos que os agregados naturais. Essas propriedades devem-se à própria natureza dos materiais, e principalmente pela alta porosidade das partículas.

Observou-se no ensaio do equivalente de areia que os AR possuem grande quantidade de partículas finas, que podem prejudicar o desempenho de betões. Um processo que contorna essa característica, reduzindo drasticamente o teor de finos do material é a

lavagem. Verificou-se que quando existe lavagem dos AR, ou seja as partículas finas têm tendência para ser próximas de zero, o desempenho dos AFR é superior.

Diante das discussões dos resultados dos ensaios nos betões produzidos com AFR provenientes de RCD em substituição ao agregado fino natural, e da utilização da água de lavagem nas amassaduras, concluiu-se que a presença desses materiais na composição provoca alterações no comportamento dos betões no estado fresco e endurecido. Esses AR podem ser utilizados nos termos mecânicos estudados por este trabalho, entretanto existem alguns cuidados e restrições a serem levados em consideração na utilização nas misturas.

De um modo geral, tanto o uso de RCD como o de água de lavagem de resíduos na produção de betão na construção civil tem a capacidade de proporcionar a redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia. Esse é o propósito da economia circular, que propõe a substituição do conceito de fim-de-vida da economia linear, por novos fluxos circulares de reutilização e renovação. A economia circular é um elemento chave para promover a separação entre o crescimento económico e o aumento no consumo de recursos.

A reutilização dos RCD na construção civil pode causar um impacto positivo tanto no reaproveitamento de materiais que seriam descartados em aterros, tanto quando diminui a necessidade da extração de areia nova, que é uma atividade que causa grande impacto ambiental nos leitos dos rios. A utilização da água de lavagem dos agregados reciclados na produção de betão também possui o potencial de diminuir a quantidade de água potável utilizada nesse processo.

De um modo geral este trabalho contribuiu para um melhor entendimento das características dos agregados finos reciclados provenientes de RCD, além das propriedades e comportamentos dos betões produzidos com AFR e com água de lavagem desses materiais. Considera-se que a utilização deste tipo de agregados e da água de lavagem na produção de betões é viável, desde que limitações sejam consideradas na composição e na produção destes betões. Considera-se que a perda de resistência nos betões produzidos com RCD compensa a diminuição do impacto ambiental que as atividades envolvidas na produção de betão são responsáveis.

## 5.2. Desenvolvimentos futuros

Neste trabalho procurou-se analisar a possibilidade de incorporação de AFR provenientes de RCD e água de lavagem desses agregados em betões. Procurou-se conhecer as características físicas dos AFR e, analisar as propriedades de betões produzidos com estes agregados.

Para que se possa conhecer o comportamento de betões com AFR de RCD e água de lavagem, é necessário continuar a analisar o comportamento desses betões e continuar a adquirir conhecimento sobre esses materiais.

Apresentam-se algumas sugestões para continuidade da pesquisa desenvolvida neste trabalho, de maneira a contribuir para a percepção dos factos constatados com a substituição dos AFN por AFR, e ainda a substituição da água da rede nas amassaduras por água de lavagem dos AFR:

- Verificar as propriedades químicas dos AFR, assim como as da água de lavagem em diferentes idades de decantação;
- Verificar a influência de agregados reciclados pré-saturados nas propriedades dos betões produzidos com água de lavagem;
- Verificar a influência de incorporação de AFR e de água de lavagem em amassaduras com relações a/c diferentes, fixando-se a trabalhabilidade da mistura;
- Verificar a influência de diferentes idades de decantação da água de lavagem utilizada na amassaduras, em relação às próprias propriedades da água e também aos efeitos provocados no comportamento mecânico do betão;
- Verificar a influência de diferentes percentagens de substituição da água de lavagem em misturas de betão;
- Verificar características do betão fresco produzido com água de lavagem, nomeadamente trabalhabilidade, teor de ar e massa volúmica;
- Verificar a durabilidade de betões produzidos com água de lavagem de AFR;
- Verificar o módulo de elasticidade dos provetes produzidos com água de lavagem;
- Verificar aspectos de durabilidade de betões produzidos com AFR e água de lavagem.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ALVES, Fátima Alexandra Passarinho.** (2007) - Betões com agregados reciclados. Levantamento do “State of Art” experimental nacional. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Portugal, 172 p.

**APEB** (2007) - “Agregados para betão: da produção à utilização”. Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto, Lisboa, Portugal, 181 p.

**BIOIS** (2010) - *Service contract on a management of construction and demolition waste*. Bio Intelligence Service: European Commission (DG ENV), Project under the framework contract ENV.G.4/FRA/2008/0112, Draft Final Report Task 2, Paris. 229 p.

**BRAVO, Miguel Nuno Caneiras.** (2016) - *Desempenho de betões produzidos com agregados reciclados obtidos a partir de RCD de centrais de reciclagem Portuguesas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 550 p.

**BUTTLER, Alexandre Marques.** (2003) - *Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos. 220 p.

**COUTINHO, A. de Sousa.** (1997) - “Fabrico e propriedades do betão”. 3ª Ed., LNEC, Lisboa, Portugal, 620 p.

**EVANGELISTA, Luís.** (2007) - *Comportamento de betões com agregados finos reciclados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Portugal, 187 p.

**EVANGELISTA, L. e BRITO, J. de** (2007) - *Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), p. 397-401.

**EVANGELISTA, L. e BRITO, J.** (2010) - *Durability Performance of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates*. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 1, p. 9-14.

**GONÇALVES, Arlindo.** (2001) - "Análise do desempenho de betões obtidos a partir de inertes reciclados provenientes de resíduos da construção". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Portugal, 158 p.

**LEITE, Mônica.** (2001) - "Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição". Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Brasil, 290 p.

**LNEC E-397** (1993) "Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão". LNEC, Lisboa.

**LNEC E-464** (2007) "Betões: Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais". LNEC, Lisboa.

**LNEC E-471** (2009) "Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos". LNEC, Lisboa.

**MEHTA, K. P. e MONTEIRO, P. J. M.** (2008) - *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

**NP EN 1097-3** (2002) "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**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.

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

**NP EN 12390-1** (2003) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes". Instituto Português da Qualidade, Caparica.

**NP EN 12390-2** (2003) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica". Instituto Português da Qualidade, Caparica.

**NP EN 12390-3** (2009) “Ensaio ao betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

**NP EN 12390-6** (2003) “Ensaio ao betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão dos provetes”. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

**NP EN 12620** (2010) - “Agregados para betão”. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 61 p.

**NP EN 13242** (2012) “Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária”. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

**NP EN 206-1** (2007) - “Betão. Parte 1: Especificação, performance, produção e conformidade”. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

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

**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.

**NP EN 933-8** (2002) “Ensaio do equivalente de areia. Parte 8: Determinação do teor de finos” Instituto Português da Qualidade, Caparica.

**PEDROZO, Ruben Francisco Esteche.** (2008) - *Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos.* Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 178 p.

**RODRIGUES, C. R. de Sá; FUCALÉ, S.** (2014) - *Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. Ambiente Construído.* 14, n. 1: p. 99-111.

**RODRIGUES, Fernando André Gregório.** (2011) - *Caracterização dos Agregados Finos Reciclados Provenientes de Centrais de Reciclagem Portuguesas.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 200 p.



## ANEXOS



## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A – RELATÓRIOS DE ENSAIOS NOS AGREGADOS NATURAIS .....	v
ANEXO B – ESFORÇOS DE ROTURA DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS BETÕES .....	ix
ANEXO C – RETA DE REGRESSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	xi
ANEXO D – RETA DE REGRESSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	xvii



# ANEXO A – RELATÓRIOS DE ENSAIOS NOS AGREGADOS NATURAIS

Areia 0/2 mm

<b>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA</b>															
NP EN 933-1 e NP EN 933-2															
<b>Procedimento de amostragem:</b>		Não aplicável													
<b>Método de redução da amostra:</b>		Não aplicável													
<b>Massa do provete de ensaio:</b>		525,0													
<b>TIPO DE PENEIRO</b>		<b>CHAPA PERFORADA (malha quadrada)</b>													
<b>PENEIRO (mm)</b>							80,0	63,0	50,0	40,0	31,5	25,0	20,0	16,0	14,0
<b>Massa retida no peneiro (g)</b>															
<b>% Retida no peneiro</b>															
<b>% Acumulada</b>															
<b>% Passada no peneiro</b>															
<b>TIPO DE PENEIRO</b>		<b>CHAPA PERFORADA (malha quadrada)</b>					<b>TELA DE ARAME (malha quadrada)</b>								
<b>PENEIRO (mm)</b>		12,5	11,2	10,0	8,0	6,3	5,0	4,0	2,00	1,00	0,50	0,250	0,125	0,063	
<b>Massa retida no peneiro (g)</b>								0,0	0,4	2,1	100,7	332,0	87,6	1,2	
<b>% Retida no peneiro</b>								0	0	0	19	63	17	0	
<b>% Acumulada</b>								0,0	0,1	0,5	19,7	82,9	99,6	99,8	
<b>% Passada no peneiro</b>								100,0	99,9	99,5	80,3	17,1	0,4	0,2	
<b>CURVA GRANULOMÉTRICA</b>															
<p>Gráfico de curva granulométrica. O eixo horizontal (DIMENSÃO mm) é logarítmico, variando de 0,001 a 100,000. O eixo vertical (% RETIDA) varia de 0 a 100. A curva mostra que 100% da amostra é retida em 1,000 mm e 0% é retida em 0,075 mm.</p>															
<b>Observações:</b>															

## Areia 0/4 mm

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA														
NP EN 933-1 e NP EN 933-2														
Procedimento de amostragem:		Não aplicável												
Método de redução da amostra:		Não aplicável												
Massa do provete de ensaio:		777,0												
TIPO DE PENEIRO		CHAPA PERFURADA (malha quadrada)												
PENEIRO (mm)					80,0	63,0	50,0	40,0	31,5	25,0	20,0	16,0	14,0	
Massa retida no peneiro (g)														
% Retida no peneiro														
% Acumulada														
% Passada no peneiro														
TIPO DE PENEIRO		CHAPA PERFURADA (malha quadrada)						TELA DE ARAME (malha quadrada)						
PENEIRO (mm)		12,5	11,2	10,0	8,0	6,3	5,0	4,0	2,00	1,00	0,50	0,250	0,125	0,063
Massa retida no peneiro (g)					0,0	1,9	11,0	13,1	115,0	304,7	263,0	55,0	7,9	1,5
% Retida no peneiro					0	0	1	2	15	39	34	7	1	0
% Acumulada					0,0	0,2	1,7	3,3	18,1	57,4	91,2	98,3	99,3	99,5
% Passada no peneiro					100,0	99,8	98,3	96,7	81,9	42,6	8,8	1,7	0,7	0,5
CURVA GRANULOMÉTRICA														
<p>Observações:</p>														

<p align="center"><b>MASSA VOLÚMICA DAS PARTÍCULAS E ABSORÇÃO DE ÁGUA</b></p> <p align="center">NP EN 1097-6 (2000)</p> <p align="center">(MÉTODO DO PICNÓMETRO)</p>																																																
Procedimento de amostragem:		Não aplicável																																														
Método de redução da amostra:		Não aplicável																																														
Massa retida no peneiro (din)		0,063 mm	Massa passada no peneiro (din) 4 mm																																													
	<b>PICNÓMETRO</b>	<b>Nº</b>	<b>0/4 mm</b>	<b>0/2 mm</b>																																												
<b>M1</b>	Massa da amostra saturada com a superfície seca	<b>g</b>	1155,0	938,9																																												
<b>M2</b>	Masa do picnómetro com o provete saturado	<b>g</b>	3741	3611																																												
<b>M3</b>	Massa do picnómetro cheio até ao traço de referência	<b>g</b>	3034	3034																																												
<b>M4</b>	Massa do provete seco	<b>g</b>	1142,1	932,2																																												
<b>T</b>	Temperatura do ensaio	<b>°</b>	20																																													
$\rho_a = \frac{M}{M_4 - (M_2 - M_3)}$	Massa específica aparente	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>	2,62	2,62																																												
			2,62																																													
$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$	Massa específica das partículas saturadas com a superfície seca	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>	2,58	2,59																																												
			2,59																																													
$\rho_{rd} = \frac{M}{M_1 - (M_2 - M_3)}$	Massa específica das partículas secas	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>	2,55	2,58																																												
			2,56																																													
$WA_{24} = \frac{100(M_1 - M_4)}{M} \times 100$	Absorção de água	<b>%</b>	1,1	0,7																																												
			0,9																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>0</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>0</b></td> <td>----</td> <td>----</td> <td>----</td> <td>----</td> <td>----</td> <td>1,0000</td> <td>0,9999</td> <td>0,9999</td> <td>0,9998</td> <td>0,9998</td> </tr> <tr> <td><b>10</b></td> <td>0,9997</td> <td>0,9996</td> <td>0,9995</td> <td>0,9994</td> <td>0,9992</td> <td>0,9991</td> <td>0,9989</td> <td>0,9988</td> <td>0,9986</td> <td>0,9984</td> </tr> <tr> <td><b>20</b></td> <td>0,9982</td> <td>0,9980</td> <td>0,9978</td> <td>0,9975</td> <td>0,9973</td> <td>0,9970</td> <td>0,9968</td> <td>0,9965</td> <td>0,9962</td> <td>0,9959</td> </tr> </tbody> </table>						0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	<b>0</b>	----	----	----	----	----	1,0000	0,9999	0,9999	0,9998	0,9998	<b>10</b>	0,9997	0,9996	0,9995	0,9994	0,9992	0,9991	0,9989	0,9988	0,9986	0,9984	<b>20</b>	0,9982	0,9980	0,9978	0,9975	0,9973	0,9970	0,9968	0,9965	0,9962	0,9959
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																						
<b>0</b>	----	----	----	----	----	1,0000	0,9999	0,9999	0,9998	0,9998																																						
<b>10</b>	0,9997	0,9996	0,9995	0,9994	0,9992	0,9991	0,9989	0,9988	0,9986	0,9984																																						
<b>20</b>	0,9982	0,9980	0,9978	0,9975	0,9973	0,9970	0,9968	0,9965	0,9962	0,9959																																						
<b>OBSERVAÇÕES:</b> Mg/m <sup>3</sup> é numericamente igual a g/cm <sup>3</sup>																																																



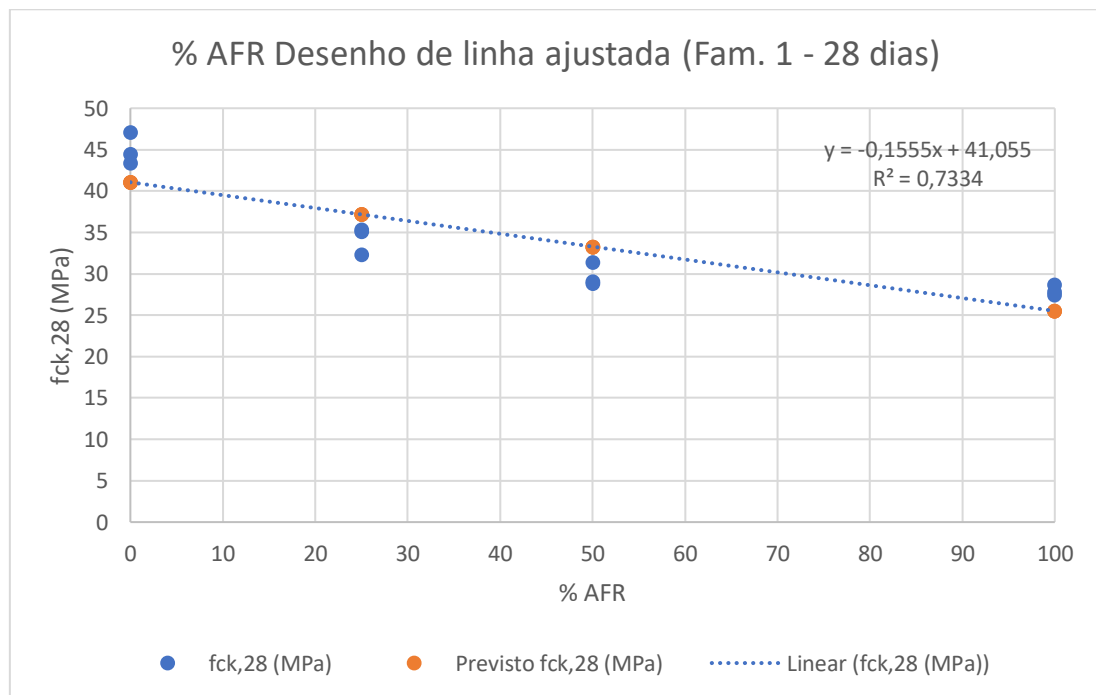
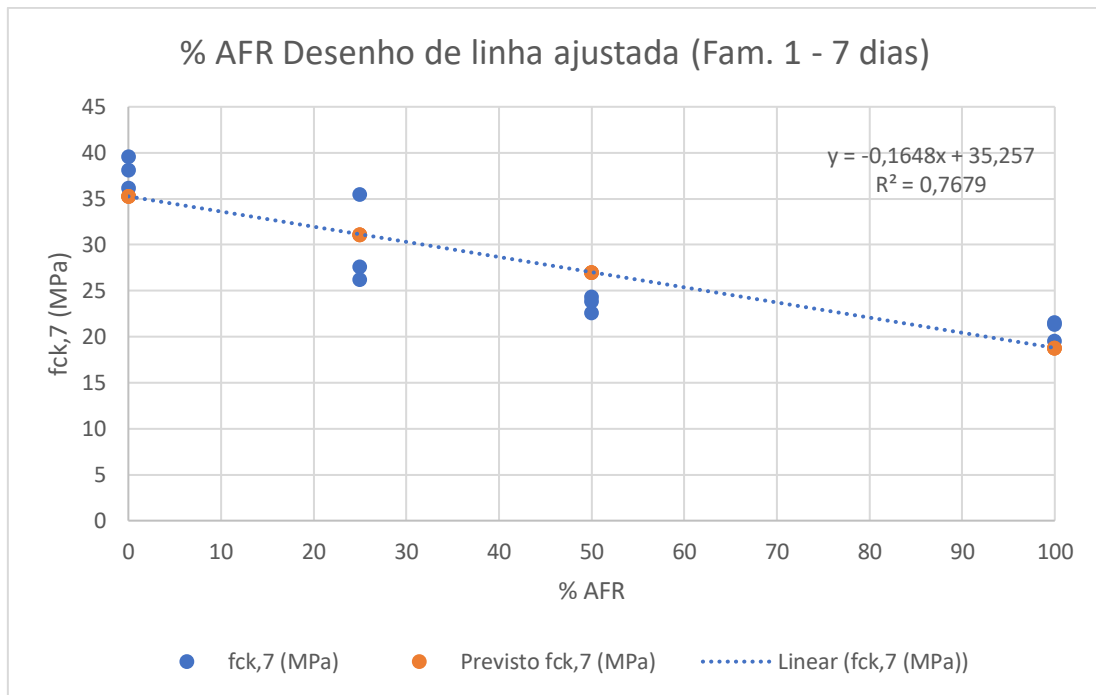
## ANEXO B – ESFORÇOS DE ROTURA DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS BETÕES

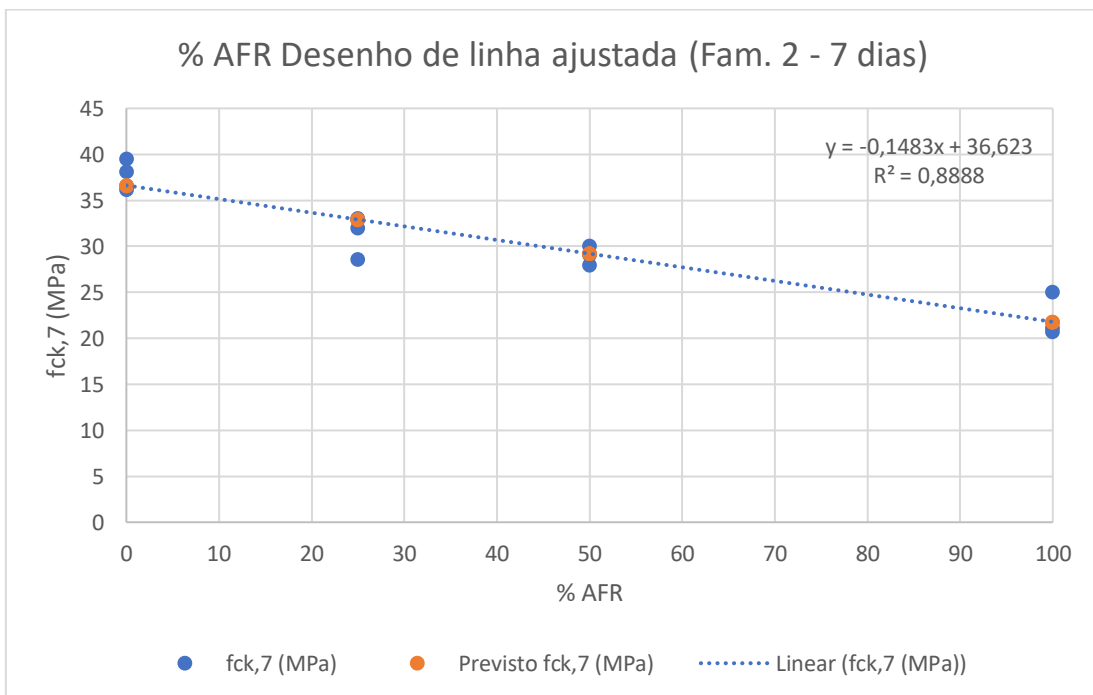
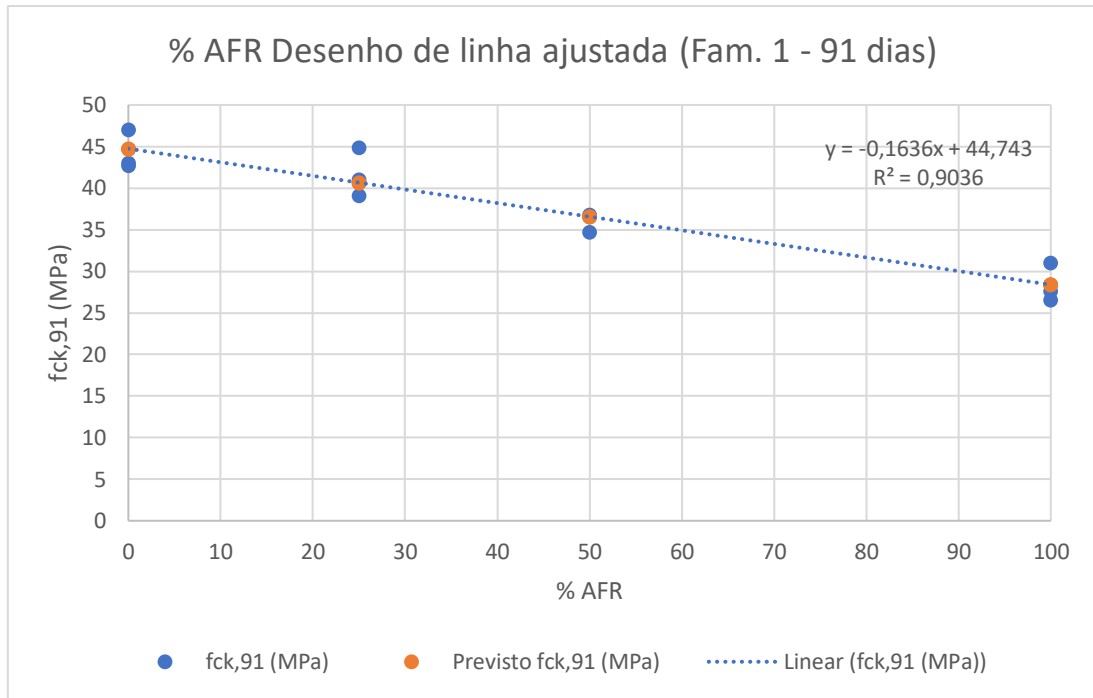
Compressão axial (KN)									
Grupo	7 dias			28 dias			91 dias		
A01	814.50	890.30	858.50	934.20	1059.00	976.50	961.50	968.20	1058.70
A02	573.20	622.30	589.70	790.00	795.40	726.90	1008.80	879.00	922.80
A03	536.60	548.20	509.20	701.40	655.00	649.70	827.60	823.50	781.20
A04	481.20	485.20	439.20	625.40	645.10	618.20	698.10	597.40	622.00
A05	720.30	744.10	643.30	832.30	850.10	887.00	946.00	877.50	819.80
A06	629.40	675.80	654.70	819.00	819.60	768.80	829.20	855.20	861.50
A07	563.40	475.70	466.00	681.00	779.90	684.00	777.00	707.90	707.70
A08	741.20	724.30	742.10	931.50	935.10	779.90	1060.90	1067.60	986.10
A09	720.20	520.50	676.90	828.00	812.70	850.30	920.70	786.50	910.90
A10	602.50	598.50	604.70	730.70	769.70	741.90	857.80	677.50	747.00
A11	466.10	457.40	475.50	628.10	616.00	632.70	681.70	756.90	678.00

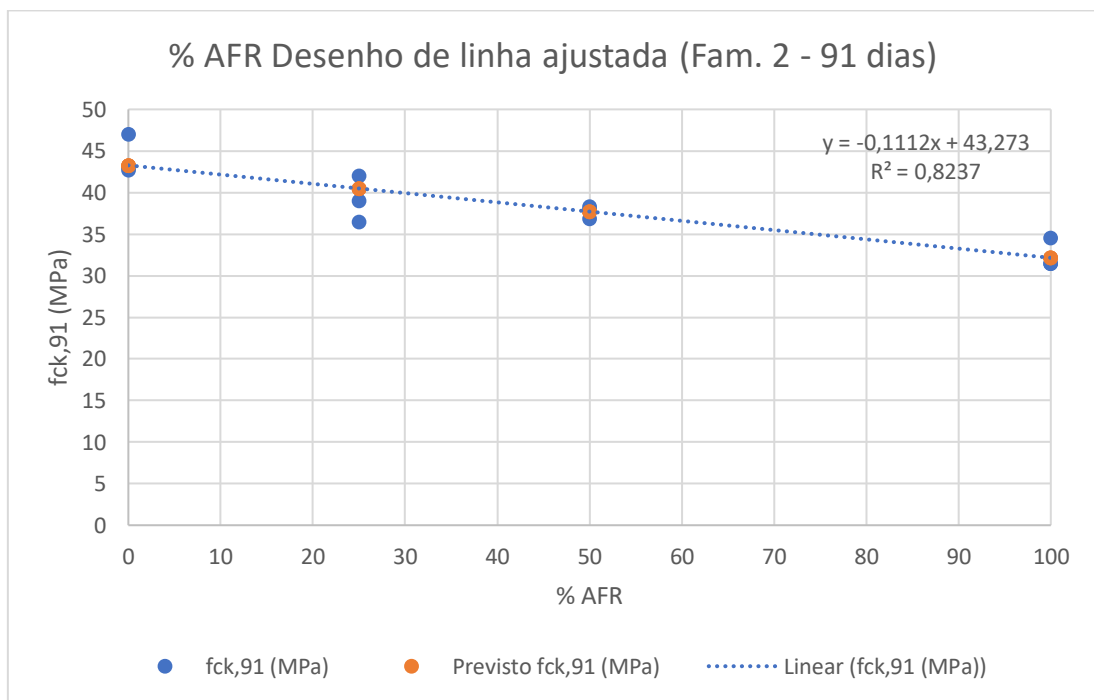
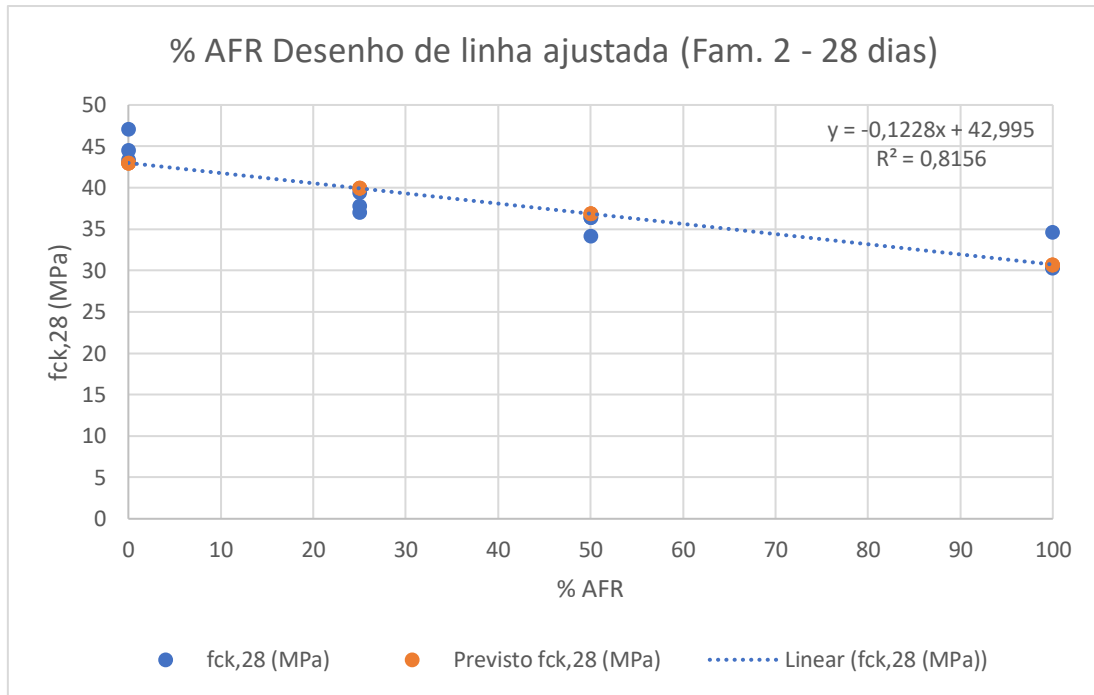
Compressão diametral (KN)									
Grupo	7 dias			28 dias			91 dias		
A01	182.80	225.60	-	190.30	210.20	249.00	215.20	266.70	-
A02	221.20	196.20	-	137.40	182.70	193.00	156.00	191.90	-
A03	157.40	129.20	-	178.30	170.50	183.30	238.80	159.70	-
A04	112.10	123.50	-	105.20	138.00	131.90	156.50	146.70	-
A05	199.90	209.20	-	190.30	219.60	204.60	121.70	259.30	-
A06	143.70	195.80	-	172.80	158.70	195.50	245.60	239.60	-
A07	100.00	92.20	-	146.80	167.80	189.00	218.30	177.80	-
A08	224.60	236.60	-	220.10	230.00	273.40	234.40	164.90	-
A09	136.60	192.20	-	198.00	250.10	246.40	202.80	227.10	-
A10	182.40	139.40	-	195.30	175.00	206.00	230.40	235.70	-
A11	131.80	72.60	-	159.30	160.90	170.00	184.80	90.10	-

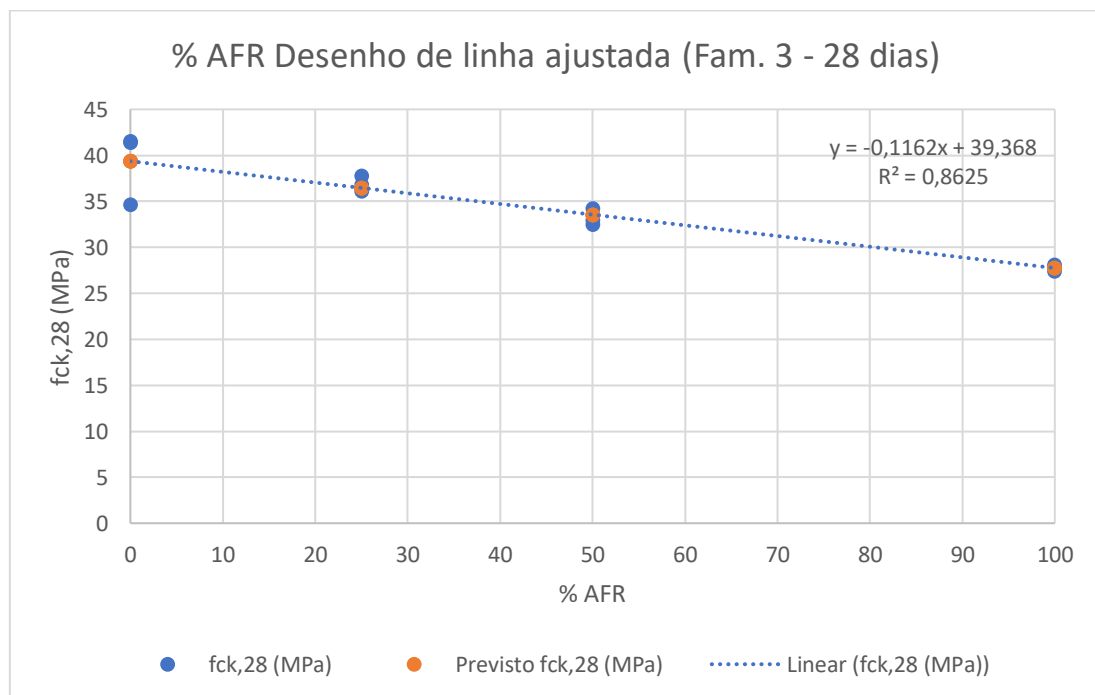
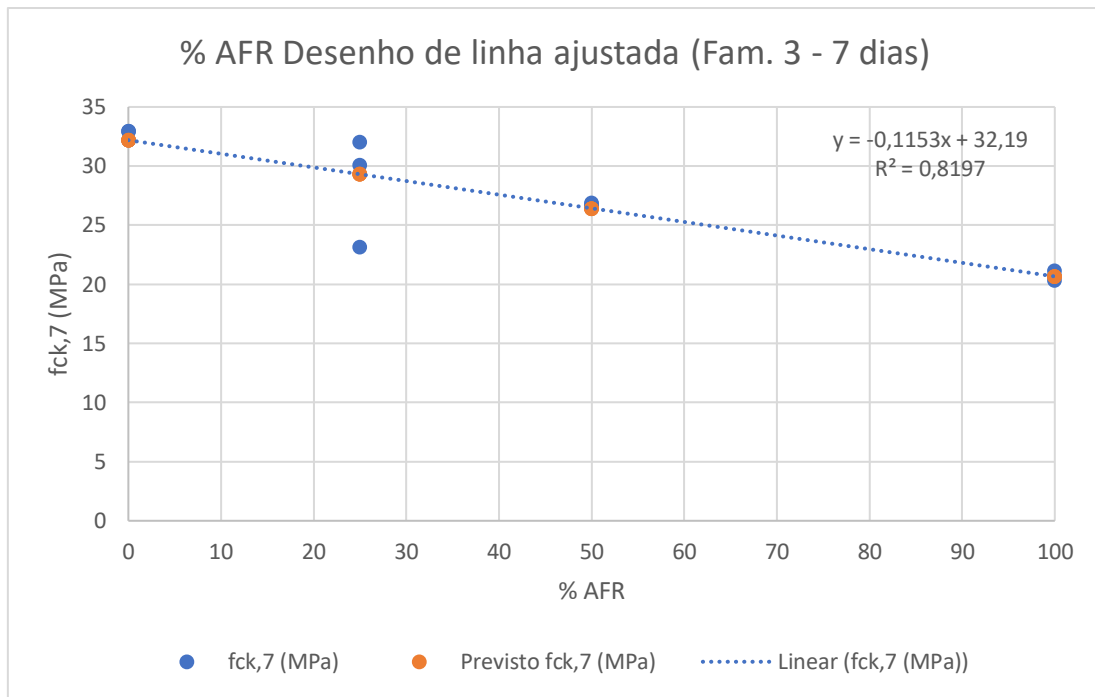


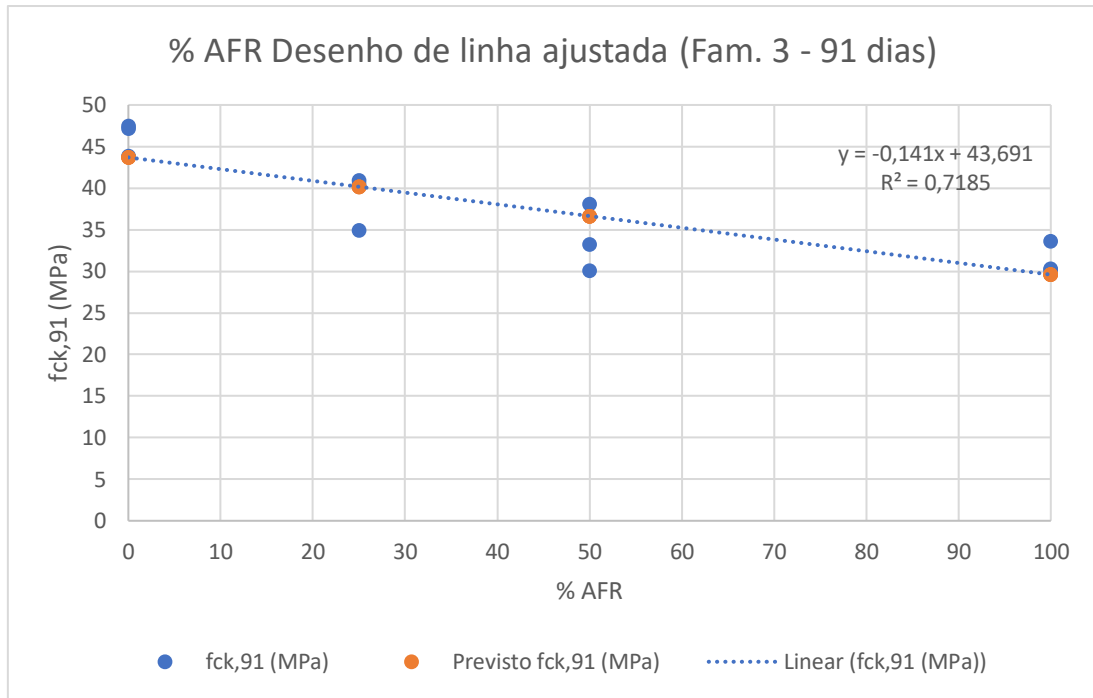
## ANEXO C – RETA DE REGRESSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL













## ANEXO D – RETA DE REGRESSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

